Journal of Agricultural Machinery

Homepage: https://jame.um.ac.ir

Research Article
Vol. 14, No. 4, 2024, p. 405-427

Comparison and Evaluation of Common Orchard Sprayers with Variable-rate Sprayers

R. Fathi[1], M. Ghasemi-Nejad Raeini[2*], S. Abdanan Mehdizadeh[2], M. Taki[2], M. Mardani Najafabadi[3]

1- PhD Student in Agricultural Mechanization, Department of Agricultural Machinery and Mechanization Engineering, Faculty of Agricultural Engineering and Rural Development, Agricultural Sciences and Natural Resources University of Khuzestan, Mollasani, Iran
2- Associate Professor, Department of Agricultural Machinery and Mechanization Engineering, Faculty of Agricultural Engineering and Rural Development, Agricultural Sciences and Natural Resources University of Khuzestan, Mollasani, Iran
3- Associate Professor, Department of Agricultural Economics, Faculty of Agricultural Engineering and Rural Development, Agricultural Sciences and Natural Resources University of Khuzestan, Mollasani, Iran
(*- Corresponding Author Email: ghasemi.n.m@asnrukh.ac.ir)

Received: 26 October 2023
Revised: 25 December 2023
Accepted: 30 December 2023
Available Online: 07 October 2024

How to cite this article:
Fathi, R., Ghasemi-Nejad Raeini, M., Abdanan Mehdizadeh, S., Taki, M., & Mardani Najafabadi, M. (2024). Comparison and Evaluation of Common Orchard Sprayers with Variable-rate Sprayers. *Journal of Agricultural Machinery*, *14*(4), 405-427. (in Persian with English abstract). https://doi.org/10.22067/jam.2023.84946.1198

Introduction

Innovative technologies, such as smart sprayers, are pivotal catalysts for modernizing the agricultural sector and play an indispensable role in providing food for human consumption. Without the utilization of these technologies and the implementation of proper input management, it is predicted that environmental impacts will worsen in the future. Attaining sustainable production while implementing programs to ensure food security, presents a considerable challenge for researchers and policymakers worldwide. In this research, the performance of a fixed-rate orchard sprayer was evaluated. Employing various equipment, the sprayer was then upgraded to a variable-rate sprayer, and its performance was reevaluated and compared to the fixed-rate model.

Material and Methods

This research comprehensively evaluated a fixed-rate orchard sprayer and subsequently upgraded it to a variable-rate sprayer for further assessment. The primary components of the developed variable-rate sprayer consist of an ON-OFF solenoid valve, a digital camera for imaging purposes, an ultrasonic sensor, a flow meter, and a control circuit. Necessary modifications were implemented on a fixed-rate turbine sprayer. The development of the variable-rate sprayer was divided into two distinct phases. The initial phase involved determining the canopy volume and acquiring the necessary information pertaining to the spraying target, specifically the tree. The subsequent phase focused on decision-making and control of the spraying rate, thereby facilitating variable-rate application. Upon laboratory examination of the samples, spectroscopic results were obtained, and the total concentration of the pesticide solution was calculated across different sections of a one-hectare orange orchard. An investigation into the sedimentation of the pesticide solution was conducted across different treatments in two spraying modes, namely variable-rate and fixed-rate, at three distinct speeds: low (1.6 km h^{-1}), medium (3.2 km h^{-1}), and high (4.8 km h^{-1}) resulting in six treatments.

Results and Discussion

©2024 The author(s). This is an open access article distributed under Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0).

https://doi.org/10.22067/jam.2023.84946.1198

The comparative analysis of average pesticide deposition on trees revealed a significant difference between the two spraying modes: variable-rate and fixed-rate. All indicators demonstrate that the type of sprayer and the spraying speed significantly influence changes in pesticide deposition across different treatments. However, the interaction effect of the type of sprayer and the speed of spraying did not significantly impact the amount of pesticide deposition on the trees or the total consumption of pesticide per hectare. The results indicated that neither the type of sprayer, nor the speed of spraying, nor their interaction had a significant effect on the spraying quality index. Furthermore, the numerical median diameter and volume median diameter were not significantly different across the treatments.

The maximum pesticide consumption savings in the variable-rate spraying mode was 46%, achieved at a speed of 1.6 km h^{-1}. The maximum efficiency was 70% in the variable-rate spraying mode, occurring at a speed of 3.2 km h^{-1}. The lowest amount of pesticide deposition on the canopy of trees was observed in the variable-rate spraying method at the speed of 4.8 km h^{-1} (1303 L ha^{-1}), and the highest amount of deposition occurred in the fixed-rate spraying at the speed of 1.6 km h^{-1} (2121 L ha^{-1}). The highest amount of pesticide release in the air was also calculated in the fixed-rate spraying mode with a speed of km h^{-1} (241 L ha^{-1}) and the lowest value was calculated in the variable-rate spraying mode with a speed of 3.2 km h^{-1}.

Conclusion

Emerging technologies, such as smart sprayers, play a crucial role in enhancing the productivity of the agricultural sector. If these technologies are not utilized, the challenges related to the sustainability of production will likely increase in the future. One of the critical operations in agricultural production is the spraying phase. In this research, a fixed-rate sprayer was upgraded to a variable-rate sprayer. Both sprayers were evaluated, and the results of this evaluation were used to compare the two spraying systems. The findings revealed that, due to real-time control of pesticide application based on canopy volume detection in the variable-rate sprayer, pesticide consumption was reduced by 46% at an optimal speed of 1.6 km h^{-1}, achieving 70% efficiency. In all studied treatments, both the type of sprayer and the speed of spraying significantly affected changes in pesticide deposition. However, the interaction between the type of sprayer and the speed of spraying did not significantly impact the amount of pesticide deposition on trees or total pesticide consumption per hectare. There was no significant difference in the coverage percentage of pesticide deposition on targets across different treatments, with the best spraying quality observed in variable-rate spraying at a speed of 4.8 km h^{-1}. By utilizing a variable-rate sprayer, costs associated with chemical pesticide consumption and spraying can be reduced, while also minimizing toxic emissions that contribute to environmental pollution. Future research should focus on developing a variable-rate system based on independent nozzles, allowing for real-time control of each nozzle's spraying.

Keywords: Energy, Environment, Sprayer, Variable rate technology

نشریه ماشین‌های کشاورزی
https://jame.um.ac.ir

مقاله پژوهشی
جلد ۱٤، شماره ٤، زمستان ۱٤۰۳، ص ٤۲۷-٤۰٥

مقایسه و ارزیابی سم‌پاش‌های متداول باغی با سم‌پاش‌های مجهز به فناوری نرخ متغیر

رستم فتحی[1]، محمود قاسمی‌نژاد رائینی[2*]، سامان آبدانان مهدی‌زاده[2]، مرتضی تاکی[2]، مصطفی مردانی نجف‌آبادی[3]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۸/۰۴
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۰/۰۹

چکیده

فن‌آوری‌های جدید مانند سم‌پاش‌های هوشمند، از مهم‌ترین عوامل تحول در بخش کشاورزی هستند. در این تحقیق یک سم‌پاش باغی نرخ ثابت به یک سم‌پاش باغی نرخ متغیر توسعه داده شد و مورد ارزیابی و مقایسه قرار گرفت. بررسی مقدار نشست سم در دو حالت سم‌پاشی نرخ متغیر و نرخ ثابت و در سه سرعت‌پیشروی کم (۱/۶)، متوسط (۳/۲) و زیاد (۴/۸ کیلومتر بر ساعت) انجام شد. کم‌ترین مقدار نشست سم روی درختان به‌ترتیب در حالت سم‌پاشی نرخ متغیر در سرعت‌پیشروی ۴/۸ (۱۳۰۳ لیتر در هکتار) و بیش‌ترین مقدار نشست در حالت سم‌پاشی نرخ ثابت در سرعت‌پیشروی ۱/۶ کیلومتر بر ساعت (۲۱۲۱ لیتر در هکتار) به‌دست آمد. نتایج آزمون تجزیه واریانس برای مقدار نشست سم روی درختان، زمین، انتشار در هوا، کل مصرف سم در هکتار و کارایی پاشش نشان داد که مقدار این شاخص‌ها در دو حالت سم‌پاشی نرخ متغیر و نرخ ثابت دارای تفاوت معنی‌داری بود. در همه‌ی شاخص‌ها نوع سم‌پاش و سرعت پیشروی سم‌پاشی، اثر معنی‌داری بر تغییرات مقدار نشست سم در تیمارهای مختلف داشت. نتایج نشان داد که نوع سم‌پاش، سرعت پیشروی و اثر متقابل این دو عامل اثر معنی‌داری بر شاخص کیفیت پاشش نداشت. قطر میانه عددی و قطر میانه حجمی نیز در همه‌ی تیمارها تفاوت معنی‌داری نداشت. حداکثر مقدار صرفه‌جویی مصرف سم (۴۶ درصد) در حالت سم‌پاشی نرخ متغیر و در سرعت‌پیشروی ۱/۶ کیلومتر بر ساعت و بیشترین مقدار کارایی پاشش (۷۰ درصد) در حالت سم‌پاشی نرخ متغیر و در سرعت‌پیشروی ۱/۶ کیلومتر بر ساعت به‌دست آمد.

واژه‌های کلیدی: انرژی، سم‌پاش، فناوری نرخ متغیر، محیط‌زیست

مقدمه

محققان گزارش کرده‌اند که فن‌آوری‌های نوین نقش مهمی در افزایش بهره‌وری و توسعه‌ی بخش کشاورزی دارند و در صورت عدم دستیابی و استفاده از این فن‌آوری‌ها برای مدیریت صحیح نهاده‌ها، اثرات زیست‌محیطی در آینده بیش‌ازپیش افزایش می‌یابد (Springmann *et al.*, 2018). به‌همین منظور در کشورهای توسعه‌یافته سامانه‌های تولید محصولات کشاورزی به دلیل استفاده از فن‌آوری‌های نوین بهبود پیدا کرده و تغییرات قابل‌توجهی در نحوه‌ی مصرف و جریان انرژی برای تولید محصولات مختلف ایجاد شده است (Baran, Lüle, & Gökdoğan, 2017). از طرفی دیگر بحران‌های زیست‌محیطی و تخریب منابع، بر امنیت غذایی در سراسر جهان، تأثیر نامطلوب گذاشته است (Yadav *et al.*, 2019). ازاین‌رو هم‌زمان با اجرای برنامه‌ها برای تأمین امنیت غذایی، دستیابی به پایداری تولید یک چالش بزرگ برای محققان و سیاست‌گذاران کشورها است (El Bilali, Callenius, Strassner, & Probst, 2019; Lindgren *et al.*, 2018). بنابراین نیاز به درک جامعی برای مدیریت موضوعات زیست‌محیطی، انرژی و اقتصادی در همه‌ی بخش‌ها خصوصا در تولید محصولات کشاورزی وجود دارد (Ciacci & Passarini, 2020). یکی از مراحل مهم در تولید محصولات کشاورزی، مرحله داشت و کاربرد سم‌پاش‌ها در این مرحله است. استفاده از سموم شیمیایی با کارایی بالا در تولید محصولات کشاورزی موضوعی اجتناب‌ناپذیر و مهم است (Ilica & Boz, 2018). در واقع سم‌پاشی به‌عنوان یک راه‌حل مشترک به‌منظور افزایش عملکرد و به‌دست آوردن محصولات با کیفیت بالاتر در زراعت و باغبانی استفاده می‌شود و یک بخش اساسی از عملیات کشاورزی است (Dou *et al.*, 2018). در کشاورزی سنتی برای انجام سم‌پاشی از سم‌پاش‌های معمولی و دارای نرخ پاشش ثابت استفاده می‌شود (Asaei, Jafari, & Loghavi, 2019). استفاده از سم‌پاش‌های سنتی و دارای نرخ پاشش ثابت، سموم شیمیایی را بدون توجه به سطح سبز و تراکم

۱- دانشجوی دکترای مکانیزاسیون کشاورزی، دانشکده مهندسی زراعی و عمران روستایی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان، ملاثانی، خوزستان، ایران.
۲- دانشیار گروه مهندسی ماشین‌های کشاورزی و مکانیزاسیون، دانشکده مهندسی زراعی و عمران روستایی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان، ملاثانی، خوزستان، ایران
۳- دانشیار گروه اقتصاد کشاورزی، دانشکده مهندسی زراعی و عمران روستایی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان، ملاثانی، خوزستان، ایران
(*- نویسنده مسئول: Email: ghasemi.n.m@asnrukh.ac.ir)

https://doi.org/10.22067/jam.2023.84946.1198

محصول در باغ به‌طور یکنواخت پخش می‌کند و درصد بالایی از مواد شیمیایی را به‌صورت رانش قطرات هدر داده و یا این‌که به علت پاشش زیاد، پس از سم‌پاشی مواد شیمیایی زیادی به‌صورت رسوب روی هدف باقی می‌ماند و در نتیجه هزینه‌های زیادی از نظر اقتصادی و زیست‌محیطی به‌وجود می‌آید (Rodrigo, Oturan, & Oturan, 2014; Dou *et al.*, 2018; Landers, 2008; Asaei *et al.*, 2019). بنابراین می‌توان بیان نمود که کاربرد تکنیک‌های سنتی در تولید محصولات کشاورزی به‌طور فزاینده‌ای باعث ایجاد تناقض بین توسعه‌ی اقتصادی و حفاظت از محیط‌زیست می‌شود (Dou *et al.*, 2018). این مسائل، ضرورت کنترل مصرف و پخش سموم شیمیایی در سم‌پاش‌های مرسوم را نشان می‌دهد (Kasner *et al.*, 2018). تحقیقات نشان داده که امروزه با به‌کارگیری فن‌آوری‌های مناسب می‌توان میزان مصرف منابع مورد نیاز برای تولید محصولات کشاورزی از جمله سموم شیمیایی را بهینه نمود و با تطبیق بهترین روش‌ها، حداکثر بهره‌وری را به‌دست آورد (Taheri-Rad, Khojastehpour, Rohani, Khoramdel, & Nikkhah, 2017).

کشاورزی دقیق[1]، یکی از فن‌آوری‌هایی است که از آن برای بهینه‌سازی کاربرد سموم شیمیایی استفاده شده است. این امر مستلزم استقرار تجهیزات مناسب، برای تخصیص بهینه نهاده‌ها است (Cobbenhagen, Antunes, van de Molengraft, & Heemels, 2021). از مهم‌ترین رویکردهای اصلی در کشاورزی دقیق، مدیریت خاص مکانی و فناوری نرخ متغیر است (Méndez-Vázquez, Lira-Noriega, Lasa-Covarrubias, & Cerdeira-Estrada, 2019). در واقع فن‌آوری‌های نرخ متغیر، یک روش موثر در این زمینه برای کاهش مصرف منابع و آلایندگی‌های زیست‌محیطی و افزایش بهره‌وری هستند (Pimentel & Lehman, 1993).

در زمینه استفاده از فن‌آوری نرخ متغیر، از روش‌های مختلفی مانند استفاده از حسگرهای اولتراسونیک (Solanelles *et al.*, 2006)، سنجش موقعیت درخت با استفاده از سامانه موقعیت‌یاب جهانی[2] (Subramanian, Burks, & Arroyo, 2006) و اسکنرهای لیزری[3] (Chen, Ozkan, Zhu, Derksen, & Krause, 2013) برای این منظور استفاده شده است. در پژوهشی توسط محققان یک سم‌پاش نرخ متغیر باغی برای باغات انگور توسعه داده شد و استفاده از این سم‌پاش به‌طور متوسط سبب ۲۱/۹ درصد صرفه‌جویی در مصرف سموم گردید (Gil, Llorens, Llop, Fàbregas, & Gallart, 2013). در تحقیقی دیگر تواری و همکاران (Tewari, Chandel, Nare, & Kumar, 2018) یک سم‌پاش باغی نرخ متغیر مبتنی بر حس‌گر اولتراسونیک[4] را توسعه داده و ارزیابی کردند. نتایج نشان داد که نازل توربو[5] در مقایسه با نازل مخروطی توخالی دارای عملکرد بهتری بود. استفاده از سم‌پاش با نازل توربو، منجر به پوشش ۴۷/۴۱٪ مناطق هدف شد. در پژوهشی دیگر یک سم‌پاش نرخ متغیر برای تنظیم خودکار خروجی محلول سم در زمان واقعی، با توجه به اندازه، شکل و تراکم شاخ و برگ درخت توسعه داده شد و کیفیت نشست قطرات سم‌پاشی مورد آزمایش قرار گرفت. پوشش محلول سم بیش از ۱۵٪ روی کاغذهای حساس به آب، نشست کافی سم روی مناطق هدف را نشان داد (Shen, Zhu, Liu, Chen, & Ozkan, 2017). در پژوهشی دیگر چِن و همکاران (Chen, Wallhead, Reding, Horst, & Zhu, 2020) یک سم‌پاش هوشمند نرخ متغیر با هدایت لیزر را برای کاهش مصرف سموم توسعه دادند. نتایج نشان داد که مصرف سموم دفع‌آفات با استفاده از سم‌پاش نرخ متغیر، کاهش قابل‌ملاحظه‌ای داشت. در تحقیق دیگر با استفاده از سم‌پاش نرخ متغیر، کاهش مصرف سم در باغات انگور ۳۰٪ برآورد شد (Berenstein, Shahar, Shapiro, & Edan, 2010). لورنس و همکاران (Llorens, Gil, Llop, & Escolà, 2010) نیز با استفاده از روش سم‌پاشی نرخ متغیر، صرفه‌جویی در مصرف سموم دفع آفات را ۵۸٪ محاسبه نمودند و بیان کردند که در سم‌پاش نرخ متغیر در مقایسه با سم‌پاش باغی با دمنده هوا، کارایی پاشش بهتر بود. شِن و همکاران (Shen *et al.*, 2017) در پژوهشی یک سم‌پاش نرخ متغیر برای تنظیم خودکار خروجی محلول سم در زمان واقعی با توجه به اندازه، شکل، تراکم شاخ و برگ درخت را توسعه دادند. نتایج نشان داد که سم‌پاش نرخ متغیر ۱۲٪ تا ۴۳٪ از میزان محلول سم مورد استفاده توسط سم‌پاش نرخ ثابت را مصرف نمود. آسایی و همکاران (Asaei *et al.*, 2019) نیز یک سم‌پاش باغی مجهز به بینایی ماشین که مقدار سموم دفع‌آفات را بر اساس تاج درخت اعمال نمود، برای مدیریت سموم شیمیایی در باغات زیتون طراحی و ارزیابی کردند. کاهش مصرف سموم ۵۴٪ برآورد شد که در باغ‌های جوان‌تر و دارای فاصله بیش‌تر بین درختان، این مقدار می‌تواند افزایش یابد. در پژوهشی اوبرتی و همکاران (Oberti *et al.*, 2016) تصویربرداری درختان را با استفاده از دوربین نصب‌شده در جلوی تراکتور در ارتفاع یک متری از سطح زمین و به‌صورت افقی انجام دادند. آن‌ها بیان کردند که سامانه بینایی بر اساس تصویربرداری از هدف می‌تواند از تصویر قابل‌مشاهده تا تصویر فراطیفی متفاوت باشد. این محققان برای تشخیص آلودگی کپک پودری روی تاک‌ها و سم‌پاشی نقطه‌ای، از تصویربرداری چندطیفی[6] (RGNIR[7]) استفاده کردند. هاکاور و

1- Precision farming
2- Global Positioning System (GPS)
3- Laser Scanner
4- Ultrasonic sensor
5- Turbo nozzle
6- Images Multispectral
7- Red-Green-Near Infrared

همکاران (Hocevar *et al.*, 2016) نیز در مورد کانوپی درخت سیب نشان دادند که می‌توان به‌صورت عملی بینایی ماشین را برای شناخت کانوپی درخت به‌کار برد.

محققان بیان کرده‌اند علی‌رغم این‌که به دلیل تعدد عوامل موثر بر عملیات سم‌پاشی، تعیین مقدار بهینه‌ی سم مورد نیاز از نظر کارایی و اثربخشی با حداقل آلایندگی‌های زیست‌محیطی بسیار دشوار است، لیکن هرگونه صرفه‌جویی حاصل از کاربرد سم‌پاشی نرخ متغیر دارای اهمیت فراوانی است، زیرا استفاده‌ی بیش‌ازاندازه از سموم شیمیایی نه‌تنها برای محیط‌زیست، بلکه برای انسان‌ها نیز خطرناک است (Gil & Escolà, 2009; Carvalho, 2017; Mamane, Raherison, Tessier, Baldi, & Bouvier, 2015).

جدول ۱- جمع‌بندی برخی از شاخص‌های مطالعاتی در تحقیقات انجام‌شده

Table 1- Indicators utilized in the conducted research

عنوان مطالعه و نتایج **Study title and results**
در پژوهشی سیستم کنترل نازل اتوماتیک با حسگر اولتراسونیک برای سم‌پاش‌های باغی را در حالت ایستا ارزیابی شد. نتایج نشان داد که حسگر اولتراسونیک توانست با تشخیص کانوپی، قطع و وصل شدن جریان سم‌پاشی را کنترل نماید. نتایج نشان داد که حسگر اولتراسونیک توانست اجسام را در فاصله ۵ متری با پایداری بالا تشخیص دهد (Zürey, Balci, & Sabanci, 2020).
تواری و همکاران (Tewari *et al.*, 2018) کاربرد یک سامانه فناوری نرخ متغیر مبتنی بر حسگر اولتراسونیک برای سم‌پاشی در باغ‌ها را با دو نوع نازل توربو و مخروطی بررسی کردند. نتایج نشان داد که سم‌پاشی با استفاده از نازل توربو باعث پوشش ۴۷/۴۱ درصدی سم‌پاشی روی کانوپی شد و صرفه‌جویی ۲۶ درصدی در مصرف سم را در پی داشت. همچنین فناوری پاشش مبتنی بر حسگر اولتراسونیک به‌خوبی توانست از سم‌پاشی در ناحیه بدون کانوپی خودداری کند.
در تحقیقی دیگر میزان نشست و انتشار سم در یک باغ مدرن بررسی گردید. نتایج نشان داد که رانش سم تا ۵۲ متر در جهت باد اتفاق افتاد که این مقدار ۱/۷ برابر بیشتر از مقدار استانداری بود که توسط استاندارد حفاظت از محیط‌زیست ایالات متحده تعریف گردیده بود (Kasner *et al.*, 2018).
اسکولا و همکاران (Escolà *et al.*, 2013) نیز یک سم‌پاش باغی نرخ متغیر مبتنی بر حسگر لیدار را برای باغات انگور طراحی و ارزیابی کردند. نتایج نشان داد که تغییر نرخ جریان سم پاشیده‌شده از طریق شیرهای نرخ متغیر الکترومغناطیسی با فرکانس بالا بر اندازه قطرات تولیدی تأثیر معنی‌داری نداشت.
زمان و همکاران (Zaman *et al.*, 2011) یک سم‌پاش نرخ متغیر را برای کنترل علف‌های هرز توسعه دادند. این سم‌پاش دارای سامانه کنترل نرخ متغیر شامل ۸ حسگر اولتراسونیک (یک حسگر در هر بخش سم‌پاش) بود. درصد پوشش سطح اهداف سم‌پاشی‌شده با پردازش تصویر بررسی شد. نتایج نشان داد که برای اهداف یکنواخت هیچ انحراف قابل‌توجهی وجود نداشت و سم‌پاش توانست علف‌های هرز را سم‌پاشی کند. درصد پوشش کاغذهای حساس به آب از ۱۰ درصد تا ۸۱ درصد متغیر بود.
گارسرا و همکاران (Garcerá, Moltó, & Chueca, 2017) کارایی سم‌پاشی در باغات مرکبات را بررسی کرده و در این پژوهش نازل‌های مخروطی استاندارد (Teejet D3 DC35) و نازل‌های ونتوری (Albuz TVI 80 03) با هم مقایسه شدند. نتایج نشان داد که تنها حدود ۴۶ درصد از محلول سم بر روی درختان (هدف) نشست کرد. نازل‌های استاندارد دارای رانش بیشتر سم در هوا (۲۳٪) نسبت به نازل‌های ونتوری (۱۷٪) بودند، اما نشست مستقیم کمتری روی زمین (۲۲٪ در مقابل ۲۷٪) داشتند.
در پژوهشی یک سامانه اندازه‌گیری تراکم کانوپی بدون سرنشین برای پشتیبانی از سم‌پاشی دقیق در باغ‌های سیب به‌منظور اعمال دقیق آفت‌کش‌ها در باغات توسعه داده شد. این سامانه شامل یک حسگر لیدار، برد الکترونیک برای انتقال داده‌ها و یک کامپیوتر بود. آزمایش‌ها در دو باغ انجام شد (یکی با درختان سیب بزرگ و دیگری با درختان سیب کوچک‌تر). نتایج نشان داد که نقشه‌های تراکم کانوپی می‌تواند تراکم بالا، متوسط و کم و همچنین مناطق بدون برگ بین درختان سیب را مشخص کند، که برای هدایت سیستم‌های مدیریت دقیق باید تشخیص داده شوند (Mahmud *et al.*, 2021).
الگوهای سم‌پاشی در چهار نوع سم‌پاش تجاری مورد استفاده در تولید محصولات زراعی مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج نشان داد که مقدار پاشش دو طرف سم‌پاش‌ها در همه سم‌پاش‌های مورد بررسی اختلاف معنی‌داری نداشت (p <۰/۰۵) و تقارن و یکنواختی سم‌پاشی در هر چهار نوع سم‌پاش در محدوده بسیار بالا (۷۶-۱۰۰٪) و زیاد (۵۱-۷۵٪) بود (Rathnayake, Chandel, Schrader, Hoheisel, & Khot, 2021).
سهیلی‌فرد و همکاران (Soheilifard, Marzban, Raini, Taki, & van Zelm, 2020) ردپای شیمیایی آفت‌کش‌های مورد استفاده در باغ‌های مرکبات (نارنگی و لیمو) را بر اساس نشست روی هدف و تلفات خارج از هدف بررسی کردند. سناریوهای مختلف سم‌پاشی بر اساس دو نوع نازل مخروطی توخالی و تی‌جت و سه سطح فشار (۳۰، ۴۰ و ۵۰ بار) در دو باغ با فاصله ردیف‌های مختلف تعریف شد. نتایج نشان داد که تنها ۲۶ تا ۳۷ درصد از محلول سم روی هدف نشست کرد. انتشار سم در هوا نیز به‌ترتیب حدود ۱۷ و ۱۸ درصد برای نازل‌های مخروطی توخالی و تی‌جت گزارش شد.
شن و همکاران (Shen *et al.*, 2017) نیز یک سم‌پاش باغی را با استفاده از سامانه هدایت دقیق لیزری توسعه دادند. دقت سم‌پاش برای شناسایی درختان با اندازه‌های مختلف و کنترل خروجی مقدار سم بر اساس ساختار درخت آزمایش شد. کیفیت نشست سم بین حالت‌های عملیاتی با نرخ متغیر و نرخ ثابت سم‌پاش نیز مقایسه شد. نتایج آزمایش‌ها توانایی سم‌پاش را برای اندازه‌گیری دقیق درختان مختلف و سپس کنترل خروجی مقدار سم از نازل‌ها به‌طور مستقل برای مطابقت با ساختار درخت را نشان داد. شباهت نمای کلی تصاویر مقایسه‌شده با دوربین دیجیتال و با حسگر لیزری برای سه درخت از ۸۱ تا ۸۹ درصد متغیر بود. سم‌پاش نرخ متغیر متناسب با اندازه و شکل درختان توانست ۱۲/۱ تا ۴۳/۳ درصد مقدار مصرف سمی که در حالت نرخ ثابت مصرف شد (۴۶۸ لیتر) را مصرف نماید.
بررسی اقتصادی دو نوع سامانه سم‌پاشی نرخ متغیر (نرخ متغیر مبتنی بر نقشه و نرخ متغیر مبتنی بر حسگر) را بررسی کردند. در این پژوهش یک چارچوب اقتصادی برای ارزیابی نرخ بازگشت سرمایه مورد نیاز برای هزینه سرمایه‌گذاری‌های در سم‌پاش نرخ متغیر برررسی شد. نتایج نشان داد که سیستم‌های نرخ متغیر مبتنی بر حسگر، هزینه‌های مالکیت بالایی دارند اما هزینه‌های سالانه تکرارشونده پایینی داشتند. در مقابل، سیستم‌های نرخ متغیر مبتنی بر نقشه، هزینه‌های مالکیت کمتری داشتند، اما دارای هزینه‌های سالانه بالاتری بودند. نتایج نشان داد که بر اساس یک سناریوی پایه، سیستم‌های نرخ متغیر با استفاده از حسگرهای NDVI با وضوح بالا و آن‌هایی که از تصاویر NDVI هوایی استفاده می‌کنند، در سطوح صرفه‌جویی نهاده ۱۱ درصد و یا بالاتر سودآور هستند (Mooney, Larson, Roberts, & English, 2009).

با توجه به مرور منابع مختلف مشاهده شد کـه اگرچـه تحقیقـات مختلفی در مورد سمپاش‌های نرخ ثابت و متغیر صورت گرفته اسـت، اما این تحقیقات اغلب بـه جنبـه‌های مـوردی و منفـرد از سـمپاش‌ها توجـه نموده‌انـد و بـه گفتـه‌ی دو و همکـاران (Dou *et al.*, 2018) زمینه‌های زیادی برای پیشرفت و نـوآوری در ایـن حـوزه وجـود دارد. توسعه، ارزیابی و مقایسـه کـاربرد فـن‌آوری نـرخ متغیـر در سم‌پاشـی باغات، اطلاعـات جـامعی در زمینـه سـم‌پاش‌های نـرخ متغیـر بـرای هرگونه تصمیم‌گیری ارائه می‌دهد. انجام ایـن تحقیـق کـه بـا هـدف بهینه‌ســازی مصــرف ســموم شــیمیایی، کــاهش آلاینــده‌هــای زیست‌محیطی، کاهش هزینه‌ها و افزایش سودآوری تولید انجـام شـد، یک نوآوری موثر و کـاربردی بـرای دسـتیابی بـه منـافع اقتصـادی و کشاورزی پایدار است. لذا هدف اصلی از این پژوهش توسعه و ارزیابی یک سم‌پاش توربینی باغی نرخ متغیر و مقایسه آن با نرخ ثابـت بـود. جدول ۱ جمع‌بندی تعدادی از مطالعات انجام‌شده در تحقیقات قبلی را نشان داده است.

مواد و روش‌ها

روش آماری و طیف‌سنجی نمونه‌ها

این پژوهش به‌منظور ارزیابی سـم‌پاش (توربـولاینر مـدل توربینـا اس.ای.۸۰۰) به دو صورت نرخ متغیر و نرخ ثابـت در دانشـگاه علـوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان و کشت و صـنعت شـهید رجـایی شهرستان دزفول در سال زراعـی ۱۴۰۲-۱۴۰۱ انجـام شـد. آزمـایش به‌صورت طرح فاکتوریل در قالب بلوک‌های کامل تصـادفی و در سـه تکرار انجام شد. فاکتور اول شامل نوع سم‌پاش در ۲ سطح (سـم‌پاش نـرخ متغیـر و سـم‌پاش نـرخ ثابـت) و فـاکتور دوم سـرعت پیشـروی سم‌پاشی در ۳ سطح (کم برابر ۱/۶ کیلومتر بر ساعت، متوسـط برابـر ۳/۲ کیلومتر بر ساعت و زیاد برابر ۴/۸ کیلـومتر بـر سـاعت) بـود. در جدول ۲ تیمارهای مورد بررسی در این پژوهش بیان شده است.

جدول ۲- تیمارهای مورد بررسی در پژوهش حاضر

Table 2- Treatments investigated in the present research

عنوان Title	تیمار ۱ T 1	تیمار ۲ T 2	تیمار ۳ T 3	تیمار ٤ T 4	تیمار ٥ T 5	تیمار ٦ T 6
توضیحات Description	سم‌پاشی نرخ متغیر با سرعت‌پیشروی ۱/۶ کیلومتر بر ساعت VRT spraying with a speed of 1.6 km hr^{-1}	سم‌پاشی نرخ متغیر با سرعت‌پیشروی ۳/۲ کیلومتر بر ساعت VRT spraying with a speed of 3.2 km hr^{-1}	سم‌پاشی نرخ متغیر با سرعت‌پیشروی ۴/۸ کیلومتر بر ساعت VRT spraying with a speed of 4.8 km hr^{-1}	سم‌پاشی نرخ ثابت با سرعت‌پیشروی ۱/۶ کیلومتر بر ساعت Fixed rate spraying with a speed of 1.6 km hr^{-1}	سم‌پاشی نرخ ثابت با سرعت‌پیشروی ۳/۲ کیلومتر بر ساعت Fixed rate spraying with a speed of 3.2 km hr^{-1}	سم‌پاشی نرخ ثابت با سرعت‌پیشروی ۴/۸ کیلومتر بر ساعت Fixed rate spraying with a speed of 4.8 km hr^{-1}

پـس از توسـعه سـم‌پاش نـرخ ثابـت بـه نـرخ متغیـر و انجـام آزمایش‌های میدانی با هر دو نوع سم‌پاش، پتری‌دیش‌ها که بـه‌منظور جمع‌آوری مقدار نشست سم روی زمین و کاغذهای فیلتری واتمن که به‌منظور جمع‌آوری مقدار نشست سـم روی درخـت و انتشـار در هـوا نصب شده بودند گردآوری شدند و به‌منظور ارزیابی شاخص‌های کمّی، در آزمایشگاه محلول پاشیده شده، در ظروف طیف‌سنجی نـوری شـد. طیف‌سنجی نمونه‌ها به‌منظور تعیین مقدار نشست سم در واحد سـطح انجام شد. در این کـار نمونـه‌هـا (پتری‌دیش‌هـا و کاغـذهای فیلتـری واتمن) با آب مقطر مورد شستشو قرار گرفتند و با استفاده از طیف‌سنج نوری غلظت ماده ردیاب مورد اسـتفاده انـدازه‌گیری شـد (Pergher 2001). به‌منظور انجام طیف‌سنجی نوری از دستگاه طیف‌سـنج نـوری مدل Biochrom Libra S22 UV-Vis استفاده شـد. ایـن دسـتگاه قابلیت نمایش طول موج‌های مختلف در غلظت‌های متفاوت و میـزان غلظت‌های مختلف در طول موج ثـابتی را دارا بـود. پـس از عملیـات طیف‌سنجی نوری، داده‌هـای جمع‌آوری‌شـده توسـط نرم‌افـزار اکسـل دسته‌بندی و بـا اسـتفاده از نرم‌افـزار SPSS[1] تجزیـه‌وتحلیـل شـدند. تغییرات لازم بر روی یک سم‌پاش توربینی نرخ ثابت کـه مشخصـات آن در جدول ۳ بیان شده است، اعمال گردید.

اجزای اصلی سم‌پاش توسعه‌یافته موردنظر در این پژوهش از شیر برقـی on و off، دوربـین دیجیتـال بـرای تصـویربرداری، حسـگر اولتراسونیک، جریان‌سنج[2] و مدار کنترلی تشکیل شد. به‌طـوری کلـی توسعه‌ی سم‌پاش نرخ متغیـر از دو بخـش تشـکیل شـد. مرحلـه اول تشخیص حجـم کـانوپی و بـه‌دسـت آوردن اطلاعـات لازم از هـدف (درخت) و مرحله دوم ارتباط و عملکرد اجزا در سم‌پاشی نرخ سم‌پاشی (اعمال نرخ متغیر) بود.

1- Statistical Package for the Social Sciences (SPSS)
2- Flow meter

جدول ۳- مشخصات سم‌پاش مورد نظر برای توسعه و انجام آزمایشات
Table 3- Characteristics of the desired sprayer for development and testing

مدل Model	حداکثر شعاع پاشش Maximum spraying radius (meters)	حجم مخزن Tank volume (liters)	تعداد و نوع نازل Number and type of nozzles	نوع اتصال به تراکتور Type of connection to the tractor	دور پروانه Propeller speed (rpm)	فشار ماکزیمم Maximum pressure (bar)
توربولاینر (مدل توربینا اس.ای.۸۰۰) Turboliner (S.E.800 turbine model)	20	800	۱۰ نازل مخروطی 10 conical nozzles	PTO گرد سوار شونده mounted PTO	قابل تغییر Adjustable	35

تشخیص حجم کانوپی

برای مصرف بهینه‌ی محلول سم، سامانه‌ی تشخیص حجم کانوپی با استفاده از پردازش تصویر به‌کار گرفته شد تا حجم کانوپی درخت برای اعمال نرخ متغیر محلول سم، مبنای سم‌پاشی قرار گیرد. مهم‌ترین کاربرد حسگر اولتراسونیک[1] نیز تشخیص حجم کانوپی و قطع جریان سم‌پاشی در فضاهای خالی بین درختان بود که در این فضاها به دلیل عدم وجود کانوپی، نیاز به سم‌پاشی نبود. برای اخذ تصاویر، از دوربین دیجیتال رنگی استفاده شد. برای تغییر نرخ محلول خروجی از سم‌پاش متناسب با حجم کانوپی از شیر برقی نرخ متغیر استفاده شد. به همین منظور یک شیر فلکه‌ای معمولی (شکل ۱) تهیه و با تغییرات لازم به یک شیر برقی نرخ متغیر تبدیل گردید. با توجه به این‌که میزان باز و بسته شدن شیر فلکه‌ای موردنظر باید متناسب با سیگنال دریافتی از مدار الکترونیکی باشد، لذا از یک موتور پله‌ای برای باز و بسته کردن شیر فلکه‌ای استفاده شد. با استفاده از تجهیزات لازم، موتور پله‌ای به نحوی روی شیر فلکه‌ای نصب و یکپارچه گردید که امکان باز و بسته شدن شیر فلکه‌ای توسط موتور پله‌ای وجود داشته باشد. از نرم‌افزار متلب برای انجام بازسازی سه‌بعدی استفاده شد.

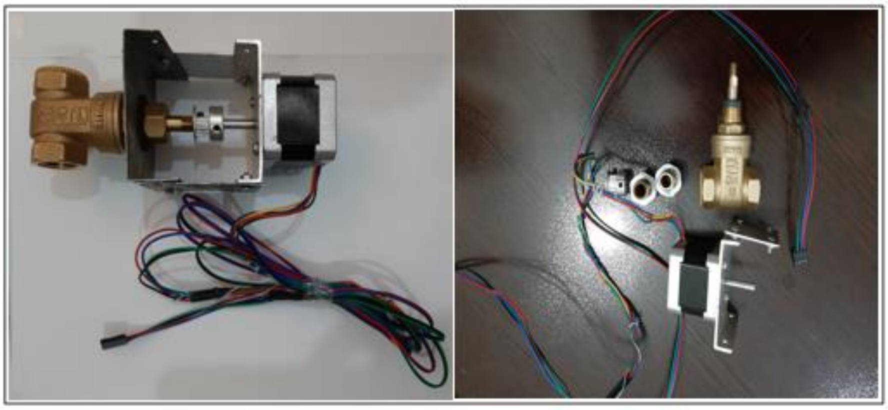
به‌منظور جلوگیری از عملکرد مداوم شیر برقی نرخ متغیر، یک شیر برقی on و off[2] تهیه و در مسیر جریان سم‌پاشی بعد از شیر برقی نرخ متغیر قرار گرفت. عملکرد این شیر، وابسته به حسگر اولتراسونیک نصب‌شده بر روی پایه مخصوصی بود که بر روی بدنه سم‌پاش قرار داشت. در نرم‌افزار متلب، فاصله مشخصی (یک متر) برای تشخیص کانوپی درختان توسط حسگر اولتراسونیک تعریف شد، به این معنی که چنانچه در فضای روبه‌روی حسگر اولتراسونیک به فاصله یک متر کانوپی وجود نداشت، جریان کل محلول خروجی توسط شیر برقی on و off قطع می‌گردید. به‌طور کلی نصب شیر برقی on و off به دو منظور انجام شد. اول این‌که مانع از کارکرد سامانه با تصویربرداری از درختان ردیف دوم شد و دوم این‌که به محض این‌که سم‌پاش وارد منطقه بدون کانوپی (فاصله بین دو درخت) گردید کل جریان سم‌پاشی توسط شیر برقی on و off قطع شد و این کار سبب گردید که نیازی به بسته شدن کامل شیر برقی نرخ متغیر نباشد. برای اجرای این عمل، حسگر اولتراسونیک فاصله‌ی بین درختان فقط تا شعاع یک متری را تشخیص داد. فاصله یک متری تعیین‌شده سبب شد که درختان موجود در ردیف بعد مبنای تصمیم‌گیری جریان نرخ متغیر قرار نگیرند. با تشخیص فاصله توسط حسگر اولتراسونیک، برد الکترونیک دستور قطع شیر برقی on و off را صادر نمود و جریان به‌طور آنی قطع شد.

به‌منظور سنجش مقدار محلول مصرفی در عملیات سم‌پاشی نیز یک کنتور الکترونیکی سنجش جریان[3] تهیه و در مسیر خروجی محلول بعد از شیر on و off قرار گرفت (شکل ۲ و ۳).

برای کنترل عملگرهای مورد استفاده، از یک برد الکترونیکی استفاده شد و با نصب نرم‌افزار آردینو بر روی رایانه، امکان تنظیم و کنترل عملگرهای مختلف توسط برد الکترونیکی فراهم گردید. تجهیزات مربوطه مانند شیر برقی نرخ متغیر، شیر on و off، کنتور دیجیتال سنجش مقدار محلول خروجی و حسگر التراسونیک هر کدام با سیم‌های رابط مخصوص خود به این برد متصل شدند. جریان الکتریسیته مورد نیاز برد الکترونیکی و همچنین لپ‌تاپ مورد استفاده، با استفاده از یک مبدل از طریق باتری تراکتور تامین شد. برد الکترونیکی مذکور روی یک پایه چوبی تعبیه‌شده بر روی سم‌پاش نصب شد (شکل ۴).

1- Ultrasonic distance measuring module. model: HY-SRF05. Static current: less than 2 mA. Detection distance: 3m-4m. High precision: up to 0.3 cm. Voltage: DC5V. made in China
2- Electric solenoid valve 12v 24V 220V. Operation mode: NC (normally closed). Inlet and outlet: hose barbs for 1/2" (outer diameter) hose. Medium temperature: 0-100°C. Usage: water and low viscosity fluids. Valve body material: brass. made in China.

3- YF-S201C Water flow sensor (flowmeter)



شکل ۱- نصب موتور پله‌ای روی شیر فلکه‌ای و تبدیل آن به شیر نرخ متغیر برقی
Fig.1. Installation of a stepper motor on a poppet valve for electric variable rate valve conversion



شکل ۲- شیر برقی on و off
Fig.2. ON-OFF solenoid valve



شکل ۳- کنتور الکترونیکی نصب‌شده در مسیر خروج محلول سم از سم‌پاش و کالیبراسیون آن
Fig.3. Electronic meter installed for the pesticide solution exit from the sprayer

برای تصویربرداری و همچنین تشخیص فاصله بین درختان، از دوربین دیجیتال و حسگر اولتراسونیک استفاده شد. به همین به‌منظور با استفاده از تجهیزات مختلف، پایه‌هایی مناسب و قابل‌تنظیم تهیه گردید. برای تنظیم و کالیبراسیون دوربین دیجیتال از کادر مکعبی و همچنین تصویربرداری از درختان مرکبات در فواصل مختلف استفاده شد.

کنترل جریان سم‌پاشی و تشخیص کانوپی با دوربین و حسگر اولتراسونیک

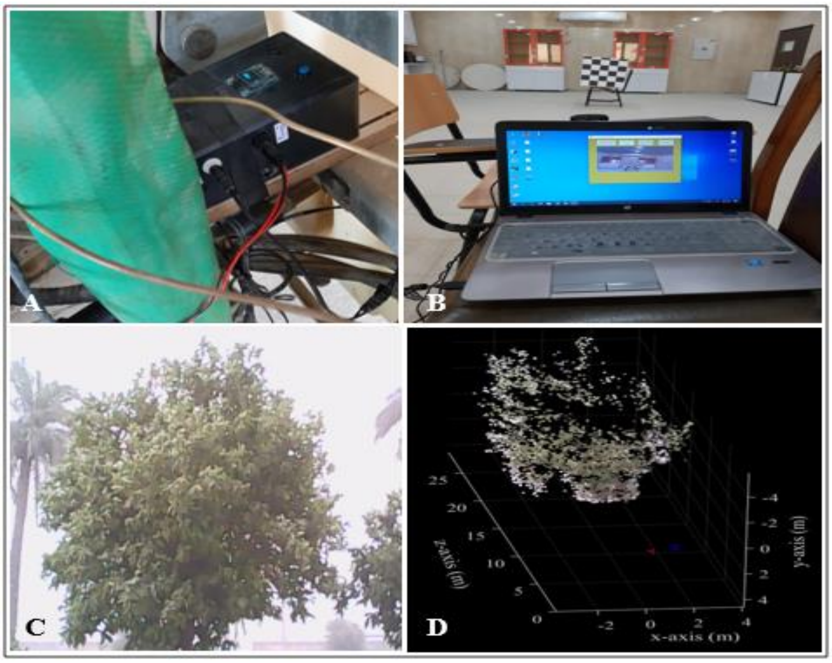
کنترل‌کننده از نوع PWM[1] و برنامه‌نویسی‌شده با نرم‌افزار متلب بود. با دریافت تصاویر آنلاین توسط دوربین و تجزیه و تحلیل آن‌ها توسط نرم‌افزار متلب، حجم درختان به‌صورت برخط محاسبه و هم‌زمان به برد الکترونیکی منتقل گردید. برد الکترونیکی یک ولتاژ متناسب با حجم کانوپی درخت به شیر برقی نرخ متغیر ارسال نمود که سبب تغییر در مقدار باز و بسته شدن شیر مذکور و نهایتا تغییر جریان سم خروجی گردید.

1- Pulse Width Modulation (PWM)

آزمایش‌های کارگاهی و میدانی

پس از تهیه و نصب تجهیزات لازم، آزمایش سم‌پاش طی دو مرحله صورت گرفت. در مرحله اول عملکرد سم‌پاش در دو حالت نرخ ثابت و نرخ متغیر در محوطه کارگاه ماشین‌های کشاورزی دانشگاه و در حالت ایستاده (بدون حرکت سم‌پاش) انجام شد. در این مرحله وضعیت سامانه تشخیص درخت به‌منظور بررسی کارکرد قطع و وصل کردن جریان سم‌پاشی آزمایش شد. در این مرحله به‌منظور اطمینان از کارکرد برنامه نرم‌افزاری نوشته‌شده، یک شی خارجی در مقابل حسگر اولتراسونیک قرار گرفت و ارزیابی لازم صورت گرفت (حالت ایستا). پس از انجام آزمایش کارگاهی مرحله اول و اطمینان از صحت کارکرد سامانه، عملیات آزمایشی دوم روی درختان موجود در محوطه دانشگاه انجام و عملکرد دستگاه مورد بررسی نهایی قرار گرفت. در این مرحله نیز صحت عملکرد دستگاه سم‌پاش و سامانه نرخ متغیر در حین حرکت مورد بررسی قرار گرفت (شکل ۵).

شکل ۶ نمای سامانه نرخ متغیر در این پژوهش را نشان داده است.



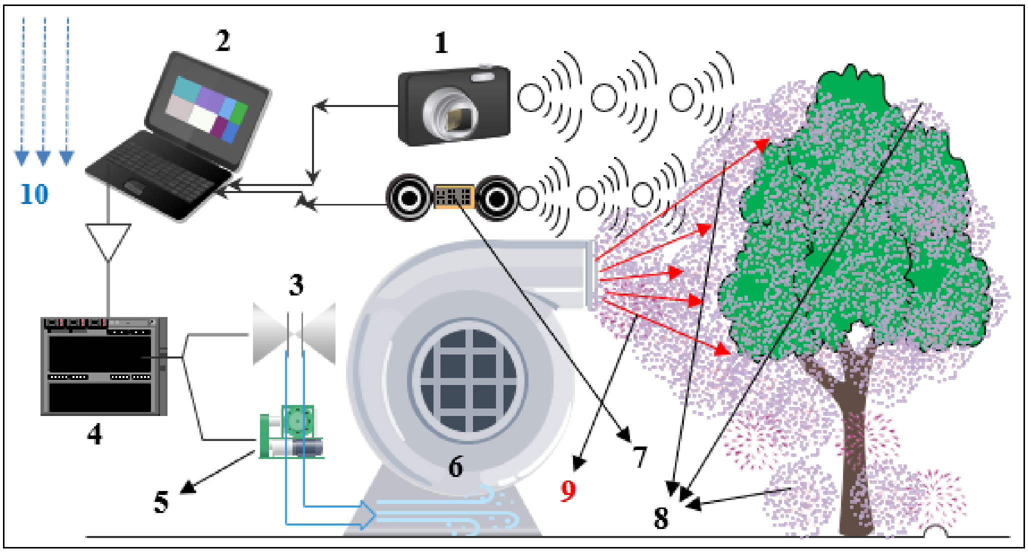
شکل ٤– A: نصب برد الکترونیک روی سم‌پاش، B: کالیبراسیون دوربین دیجیتال، C: تصویربرداری از درختان، D: برآورد حجم کانوپی

Fig.4. A: The electronic board installed on the sprayer, B: Digital camera calibration, C: Tree imaging, and D: Canopy volume estimation



شکل ٥– A: ارزیابی برنامه نرم‌افزاری تشخیص و محاسبه حجم کانوپی، B: نصب شیر برقی on و off و شیر برقی نرخ متغیر، C: آزمایش کارگاهی سم‌پاش نرخ متغیر، D: آزمایش میدانی سم‌پاش نرخ متغیر

Fig.5. A: Evaluation of the software program for canopy recognition and canopy volume calculation, B: Installation of the ON-OFF solenoid valve and the variable rate solenoid valve, C: Testing the variable rate sprayer in the workshop, and D: Testing the variable rate sprayer on the field



شکل ٦– نمای سامانه‌ی سم‌پاشی نرخ متغیر: ۱. دوربین، ۲. رایانه (پردازشگر داده‌ها)، ۳. شیر برقی on و off، ۴. برد الکترونیک، ۵. شیر برقی نرخ متغیر، ۶. سم‌پاش، ۷. حسگر اولتراسونیک، ۸. نقاط بادبردگی، ۹. جهت سم‌پاشی، ۱۰. جهت باد

Fig.6. An overview of the variable rate spraying system: 1. Camera, 2. Computer (data processing), 3. ON-OFF valve, 4. Electronic board, 5. Variable rate valve, 6. Sprayer, 7. Ultrasonic sensor, 8. Drift points, 9. Spraying direction, and 10. Wind direction

عملیات میدانی و ارزیابی نهایی سم‌پاش موردنظر در باغات مرکبات کشت و صنعت شهید رجایی شهرستان دزفول انجام شد. همه‌ی آزمایش‌ها در دو حالت سم‌پاشی نرخ ثابت و نرخ متغیر و در سه سرعت‌پیشروی متفاوت (کم، متوسط و زیاد) (۱/۶، ۳/۲ و ۴/۸ کیلومتر بر ساعت) و با سه تکرار اجرا و شاخص‌های عملکردی سم‌پاشی اندازه‌گیری شد. پس از تنظیم سرعت پیشروی و سایر پارامترهای عملکردی مانند فشار و سرعت فن، عملیات سم‌پاشی اجرا شد. پارامترهای محیطی مانند سرعت باد، دما و رطوبت هوا حین انجام آزمایش‌ها اندازه‌گیری و ثبت گردید. به‌منظور اندازه‌گیری سرعت باد و دما از بادسنج و دماسنج[1] (TAM 618، کشور چین) و برای اندازه‌گیری رطوبت از دستگاه رطوبت‌سنج[2] (Precision Hair Hygromete، کشور آلمان) که رطوبت را در دامنه دمایی ۳۵- تا ۶۵+ درجه سانتی‌گراد و در بازه صفر تا ۱۰۰ درصد نشان می‌دهد، استفاده شد (شکل ۷). اندازه‌گیری پارامترهای هواشناسی در روز سم‌پاشی نشان داد که سرعت باد ۰/۶ معادل کیلومتر بر ساعت (جهت وزش باد: شرقی-غربی)، رطوبت نسبی ۰/۴۲ و دمای هوا ۴۰/۵ درجه سانتی‌گراد بود.

روش تعیین سطح برگ درختان مورد آزمایش

برای تعیین میزان سطح برگ درختان مورد بررسی در عملیات سم‌پاشی دو شاخص تراکم سطح برگ (LAD) و حجم کانوپی درخت با در نظر گرفتن مساحت دو رویه برگ اندازه‌گیری شدند (رابطه ۱):

$$S_T=2\times \text{LAD}\times V_T \qquad (۱)$$

در این رابطه:

LAD: تراکم سطح برگ (مترمربع برگ به‌ازای مترمکعب کانوپی)

V_T: میانگین حجم ظاهری کانوپی درخت (مترمکعب در هر درخت) می‌باشد.

به همین منظور یک مکعب با ابعاد ۵۰*۵۰*۵۰ تهیه و از نقاط مختلف درخت برگ‌هایی جدا و جمع‌آوری شده و وزن گردیدند. سپس با استفاده از نسبت وزن برگ در واحد حجم کانوپی سطح برگ درخت[3] به‌دست آمد. برای به‌دست آوردن نسبت سطح برگ به وزن آن، تعداد ۱۰ برگ با استفاده از ترازوی دیجیتال وزن شده و با استفاده از نرم‌افزار متلب و پردازش تصویر سطح این برگ‌ها محاسبه شد. در نهایت با استفاده از دو نسبت به‌دست‌آمده یعنی وزن برگ‌ها[4] (LW) در واحد حجم کانوپی[5] (CV) (رابطه ۲) و سطح برگ‌ها به وزن آن‌ها (رابطه ۳)، تراکم سطح برگ[6] محاسبه شد (شکل ۸).

1- Wind speedometer model DT-618 made by CEM company. Made in China
2- Measuring range: 0%– 100% relative humidity. Temperature range: - 35°C to + 65°C. Reading accuracy: ±5%. Diameter: 100mm. made in Germany

3- Tree Leaf Surface
4- Leaf weight
5- Canopy volume
6- Leaf Surface Density

$$TLS=\frac{LW}{CV} \qquad (۲)$$

در رابطه (۲)، LW: وزن برگ‌ها (گرم به‌ازای برگ) و CV: حجم ظاهری کانوپی درخت (مترمکعب در هر درخت) بود.

$$LSD=\frac{LAD}{LW} \qquad (۳)$$

در رابطه (۳) نیز، LAD: تراکم سطح برگ (مترمربع برگ به‌ازای مترمکعب کانوپی) و LW: وزن برگ‌ها (گرم به‌ازای برگ) بود.



شکل ۷– بادسنج، دماسنج و رطوبت‌سنج مورد استفاده در اندازه‌گیری پارامترهای هواشناسی

Fig.7. Anemometer, thermometer, and hygrometer used for measuring the meteorological parameters



شکل ۸– محاسبه سطح برگ با استفاده از پردازش تصویر

Fig.8. Leaf area calculated using image processing

برای محاسبه حجم ظاهری درختان نیز کانوپی آن‌ها به‌صورت بیضی فرض گردید و حجم آن‌ها بر همین اساس با استفاده از رابطه (۴) محاسبه شد. برای این منظور یک تصویر در راستای عمود بر خط کاشت و یک تصویر هم در راستای خط کاشت اخذ شد و قطر متوسط این دو تصویر بعد از جداسازی تصویر درخت از پس‌زمینه در رابطه (۴) قرار داده شد و حجم گیاه به‌دست آمد.

$$V_T=\frac{1}{6}\times\pi\times d_{ac-r}\times d_{al-r} \qquad (۴)$$

در این رابطه d_{ac-r} میانگین قطر کانوپی عمود بر ردیف، d_{al-r}

میانگین قطر کانوپی در راستای ردیف درختان و h ارتفاع کانوپی درخت است.

مقایسه و ارزیابی میزان پاشش و کارایی سم‌پاشی در دو حالت نرخ ثابت و نرخ متغیر

برای اندازه‌گیری میزان مصرف سم در واحد سطح، از مخلوط آب و رنگ تارترازین[1] زرد رنگ جهت پاشش استفاده گردید. این رنگ نوعی رنگ خوراکی است که به میزان ۶-۵ گرم بر لیتر در آب حل می‌شود (Gil *et al.*, 2013). به‌منظور بررسی میزان نشست سم در واحد سطح، محلول آب و تارترازین بر اساس مقادیر مشخص و تنظیم‌شده سم‌پاشی شد و میزان نشست محلول سم روی کانوپی در نقاط مختلف (بالا، وسط و پایین کانوپی) مورد بررسی قرار گرفت. مقدار کارایی سم‌پاشی از طریق اندازه‌گیری نشست سم روی کانوپی درخت به‌عنوان هدف و انتشار محلول سم به نقاط غیرهدف (خارج از کانوپی) به‌دست آمد (Soheilifard *et al.*, 2020). هدف از محاسبه‌ی مقدار کارایی، مقایسه عملکرد دو سامانه سم‌پاش نرخ ثابت و نرخ متغیر در استفاده بهینه از محلول سم بود. پس از اندازه‌گیری مقدار نشست سم در نقاط مختلف، تحلیل آماری به‌منظور مقایسه کارایی در دو نوع سم‌پاش نرخ ثابت و نرخ متغیر انجام شد. برای اندازه‌گیری مقدار نشست سم روی درخت، از کاغذهای فیلتری واتمن به‌عنوان جمع‌کننده استفاده شد. این کاغذها قبل از انجام عملیات سم‌پاشی با استفاده از ابزار لازم بر روی درخت نصب شدند. برای اندازه‌گیری نشست محلول سم روی زمین نیز از پتری‌دیش استفاده گردید. این پتری‌دیش‌ها به فاصله ده سانتی‌متری از هم در مسیر عمود بر جهت حرکت سم‌پاشی در زیر درخت و همچنین در فواصل کنار درخت بر روی زمین قرار گرفتند. علاوه بر پوشش عرضی پتری‌دیش‌ها در زیر و کنار درختان، آن‌ها تا فاصله ۳۲ متری از مسیر سم‌پاشی نیز بر روی زمین قرار گرفتند. برای اندازه‌گیری انتشارات محلول سم به هوا نیز از کاغذهای فیلتری واتمن با مساحت ۵۰/۲۴ سانتی‌مترمربع استفاده شد. این کاغذها بر روی تیرک‌های چوبی به ارتفاع ۵/۵ متر از سطح زمین و در فاصله بین درختان نصب شدند. همه‌ی پتری‌دیش‌ها و کاغذهای فیلتری واتمن کدگذاری شدند و پس از انجام عملیات سم‌پاشی برای انتقال به آزمایشگاه و انجام عملیات طیف‌سنجی جمع‌آوری شدند. پس از انجام عملیات سم‌پاشی، جمع‌کننده‌های مورد استفاده در آزمایشگاه با آب مقطر مورد شستشو قرار گرفتند و با استفاده از طیف‌سنج نوری، غلظت ماده ردیاب اندازه‌گیری شد (Pergher, 2001). به‌منظور انجام طیف‌سنجی از دستگاه طیف‌سنج نوری (Biochrom Libra S22 UV-Vis، کشور چین) استفاده گردید. در این روش غلظت ماده ردیاب بر اساس قرائت دستگاه طیف‌سنج و روابط (۵) و (۶) محاسبه گردید (Garcera *et al.*, 2017).

$$C_{target}=\frac{V_w \times A_w}{D_t \times f} \quad (۵)$$

$$C=\frac{C_{collector}}{S} \quad (۶)$$

در این روابط: C_{target}: مقدار نشست سم روی هدف بر حسب میکرولیتر در هر جمع‌کننده (پتری‌دیش)

A_w: قرائت دستگاه (بر حسب میکرولیتر در میلی‌لیتر آب)

V_w: حجم آب استفاده‌شده برای شستشوی پتری‌دیش (میلی‌لیتر)

D_t: غلظت ماده ردیاب در سم‌پاشی

f: درصد بازیابی ماده ردیاب مورد استفاده در سم‌پاشی

C: مقدار نشست سم در واحد سطح (بر حسب میکرولیتر بر سانتی‌متر مربع)

$C_{collector}$: مقدار نشست سم در هر جمع‌کننده (بر حسب میکرولیتر در جمع‌کننده)

S: مساحت هر پتری‌دیش یا جمع‌کننده (بر حسب سانتی‌متر مربع) بود.

مقایسه و ارزیابی کیفیت سم‌پاشی در دو حالت نرخ ثابت و نرخ متغیر

برای بررسی میزان یکنواختی پاشش، از شاخص کیفیت پاشش استفاده شد که بر اساس متوسط اندازه‌ی قطرات محاسبه گردید. اندازه‌ی متوسط قطرات به دو صورت قطر میانه عددی و قطر میانه حجمی بیان می‌گردد. قطر میانه عددی در واقع قطرات پخش‌شده را بر حسب تعداد به دو بخش مساوی تقسیم می‌کند، در حالی‌که قطر میانه حجمی، میزان محلول پاشیده‌شده را به دو بخش تقسیم می‌کند، به گونه‌ای که حجم کل تمام قطره‌های کوچک‌تر از میانه حجمی برابر با حجم کل تمام قطرات بزرگ‌تر از قطر میانه حجمی باشد (Shafii, 2008). سپس شاخص کیفیت را می‌توان از تقسیم قطر میانه حجمی بر قطر میانه عددی محاسبه نمود. هرچه عدد به‌دست‌آمده به عدد یک نزدیک‌تر باشد، پاشش دارای کیفیت بالاتری است. به‌عبارتی دیگر در بهترین شرایط، قطر میانه حجمی و قطر میانه عددی برابر است که البته در عمل رسیدن به آن غیرممکن است. شاخص کیفیت پاشش بر اساس رابطه (۷) محاسبه شد (Safari, Amirsheghaghi, Loveymi, & Chagi, 2009).

$$SQI=\frac{VMD}{NMD} \quad (۷)$$

در رابطه (۷)، SQI: شاخص کیفیت پاشش[2]، VMD: قطر میانه حجمی[3] (میلی‌متر) و NMD: قطر میانه عددی[4] (میلی‌متر) می‌باشد.

1- Tartrazine

2- Spray Quality Index (SQI)
3- Volume Median Diameter (VMD)
4- Number Median Diameter (NMD)



شکل ۹- دستگاه طیف‌سنج نوری مدل Biochrom Libra S22 UV-Vis

Fig.9. Biochrom Libra S22 UV-Vis optical spectrometer

نتایج و بحث

مقدار نشست محلول سم روی درختان در حالت‌های مختلف سم‌پاشی

نتایج آزمون تجزیه واریانس مقدار نشست محلول سم روی درختان در یک هکتار در دو حالت سم‌پاشی نرخ متغیر و نرخ ثابت در جدول ۴ نشان داده شده است. نتایج نشان داد که مقدار نشست محلول سم در دو حالت سم‌پاشی نرخ متغیر و نرخ ثابت با هم دارای تفاوت معنی‌داری بود. با توجه به سطح معنی‌داری (Sig<0.05)، نتیجه گرفته شد که بین میانگین مقدار نشست سم روی درختان در حالت‌های سم‌پاشی نرخ متغیر و نرخ ثابت و همچنین در سرعت‌های مختلف، تفاوت معنی‌داری وجود داشت. نتایج نشان داد که اثر متقابل نوع سم‌پاش و سرعت پیشروی سم‌پاشی تفاوت معنی‌داری بر مقدار نشست سم روی کانوپی نداشت.

جدول ٤- نتایج آزمون تجزیه واریانس مقدار نشست محلول سم روی درختان در حالت‌های مختلف سم‌پاشی

Table 4- ANOVA test results of pesticide solution deposition on trees in different spraying modes

منابع تغییرات Source of variation	درجه آزادی df	میانگین مربعات Mean square	F	P-value
سرعت پیشروی Speed	2	185547.556	7.418	.008**
نوع سم‌پاش Type of sprayer	1	1175555.556	46.995	.001**
نوع سم‌پاش* سرعت پیشروی Speed * Type of sprayer	2	31920.889	1.276	.314ns
خطا Error	12	25014.611		
ضریب تغییرات Coefficient of Variation (CV)	0.20			

** در سطح ۱ درصد معنی‌دار است، * در سطح ۵ درصد معنی‌دار است، ns: غیر معنی‌دار

ns: Not significant, *Significant at the probability level of 5%, **Significant at the probability level of 1%

پس از بررسی کاغذهای فیلتری واتمن در آزمایشگاه، نتایج طیف‌سنجی به‌دست آمد و با توجه به مساحت هر کاغذ فیلتری واتمن (۵۰/۲۴ سانتی‌مترمربع)، مقدار سطح برگ درخت، فضای اختصاصی هر درخت و تعداد درختان در یک هکتار، مقدار کل نشست محلول سم رو درختان در یک هکتار باغ مرکبات (پرتقال) محاسبه شد. جدول ۵ نتایج بررسی مقدار نشست محلول سم روی کانوپی درختان در تیمارهای مختلف در دو حالت سم‌پاشی نرخ متغیر و نرخ ثابت و در سه سرعت‌پیشروی مختلف را نشان داده است.

جدول ۵- نتایج بررسی مقدار نشست محلول سم روی درختان در یک هکتار در حالت‌های مختلف سم‌پاشی
Table 5- The results of pesticide solution deposition on trees in different spraying modes

عنوان Title	تیمار ۱ T 1	تیمار ۲ T 2	تیمار ۳ T 3	تیمار ٤ T 4	تیمار ٥ T 5	تیمار ٦ T 6
مقدار نشست روی یک کاغذ فیلتری واتمن Deposition on one Whatman filter paper (L)	0.00039	0.00036	0.00033	0.00054	0.00051	0.00042
مقدار سطح برگ یک درخت Leaf surface of one tree (cm^2)	960395	960395	960395	960395	960395	960395
مقدار کل نشست روی یک درخت Total deposition on one tree (liters per tree)	7.48	6.79	6.39	10.39	9.72	8.07
تعداد درختان در یک هکتار Number of trees in one hectare	204	204	204	204	204	204
مقدار نشست بر درختان یک هکتار Deposition on one hectare of trees (liters per hectare)	1527^{a}	1387^{a}	1303^{b}	2121^{a}	1983^{a}	1646^{b}

با توجه به نتایج جدول فوق، کم‌ترین مقدار نشست سم (۱۳۰۳ لیتر در هکتار) روی کانوپی به‌ترتیب در حالت سم‌پاشی نرخ متغیر در سرعت‌پیشروی ۴/۸ کیلومتر بر ساعت و بیش‌ترین مقدار نشست در حالت سم‌پاشی نرخ ثابت در سرعت‌پیشروی ۱/۶ کیلومتر بر ساعت (۲۱۲۱ لیتر در هکتار) به‌دست آمد. در پژوهشی با تجزیه واریانس مربوط به اثر پارامترهای عملیاتی بر درصد نشست محلول سم در بخش داخلی کانوپی درخت، محققان گزارش کردند که اثرات سه‌گانه‌ی فشار، سرعت پیشروی سم‌پاش و نوع نازل بر مقدار نشست محلول سم معنی‌دار بود. این محققان گزارش کردند که بیشترین مقدار نشست سم (۶۷ درصد) در فشار ۶۵۰ پی‌اس‌آی و سرعت‌پیشروی ۱ کیلومتر بر ساعت در نازل مخروطی توخالی و کمترین میزان نشست سم (۱۲ درصد) در فشار ۴۵۰ پی‌اس‌آی و سرعت‌پیشروی ۱۰ کیلومتر بر ساعت برای نازل مخروطی توپر به‌دست آمد. همچنین درصد نشست قطرات سم بر سطح پشتی برگ در بخش بیرونی کانوپی بین مقدار ۱ و ۱۴ درصد متغیر بود (Soheilifard *et al.*, 2020).

مقدار نشست محلول سم روی زمین در حالت‌های مختلف سم‌پاشی

نتایج آزمون تجریه واریانس مقدار نشست سم روی زمین در حالت‌های مختلف سم‌پاشی نشان داد که نوع سم‌پاش و سرعت پیشروی اثر معنی‌داری بر مقدار نشست سم روی زمین داشتند، ولی اثر متقابل نوع سم‌پاش و سرعت پیشروی اثر معنی‌داری بر مقدار نشست سم روی زمین نداشت (جدول ۶).

جدول ٦- نتایج تجزیه واریانس مقدار نشست محلول سم روی زمین در یک هکتار در حالت‌های مختلف سم‌پاشی
Table 6- ANOVA test results of pesticide solution deposition on the ground per hectare in different spraying modes

منابع تغییرات Source of variation	درجه آزادی df	میانگین مربعات Mean square	F	P-value
سرعت پیشروی Speed	2	15438.389	5.070	.025**
نوع سم‌پاش Type of sprayer	1	5730240.889	1881.887	.001**
نوع سم‌پاش* سرعت پیشروی Speed * Type of sprayer	2	9641.722	3.166	.079^{ns}
خطا Error	12	3044.944		
ضریب تغییرات Coefficient of Variation (CV)	0.52			

** در سطح ۱ درصد معنی‌دار است، * در سطح ۵ درصد معنی‌دار است، ns: غیر معنی‌دار
ns: Not significant, *Significant at the probability level of 5%, **Significant at the probability level of 1%

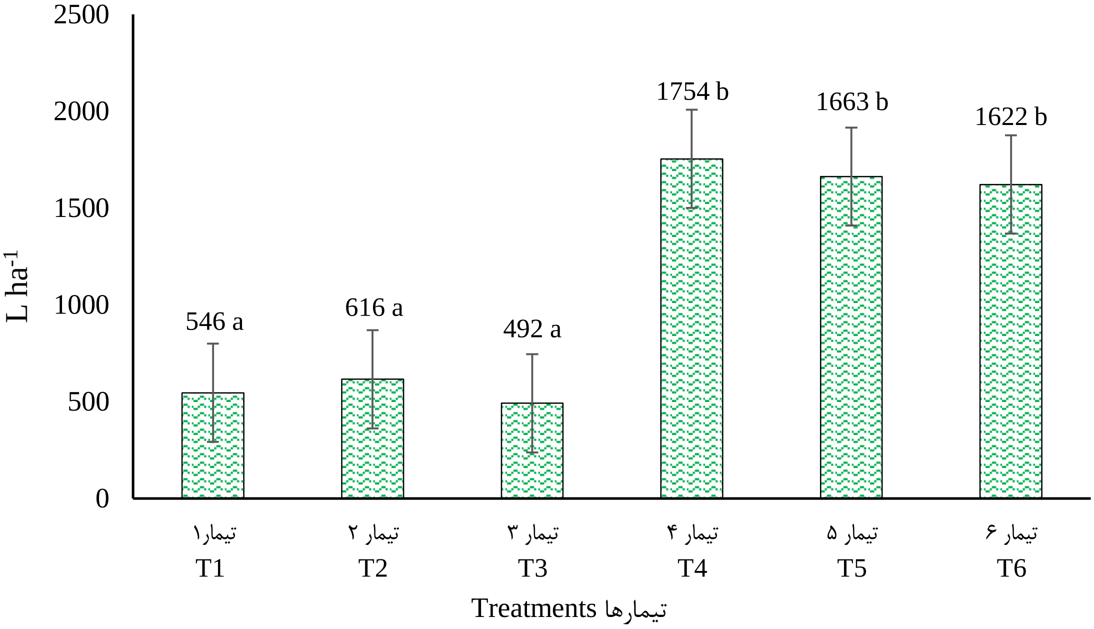
به‌منظور بررسی مقدار نشست محلول سم روی زمین، طیف‌سنجی گردآورنده‌های نصب‌شده در فضای زیر کانوپی و روی زمین انجام شد. شکل ۱۰ نتایج بررسی مقدار نشست سم روی زمین در حالت‌های مختلف سم‌پاشی را نشان داده است. کمترین مقدار نشست سم روی زمین در حالت سم‌پاشی نرخ متغیر و در سرعت‌پیشروی ۱/۶ کیلومتر بر ساعت (۵۴۶ لیتر بر هکتار) و بیشترین

مقدار در حالت سمپاشی نرخ ثابت و در سرعت‌پیشروی ۱/۶ کیلومتر بر ساعت (۱۷۵۴ لیتر بر هکتار) محاسبه شد.

مقدار انتشار محلول سم در هوا در حالت‌های مختلف سمپاشی

جدول ۷ نتایج آزمون تجزیه واریانس مقدار انتشار سم در هوا در حالت‌های مختلف سمپاشی را نشان داده است. نتایج آزمون تجزیه واریانس مقدار انتشار سم در هوا نشان داد که نوع سم‌پاش، سرعت پیشروی سمپاشی و اثر متقابل نوع سم‌پاش و سرعت پیشروی اثر معنی‌داری بر مقدار انتشار سم در هوا داشتند. این موضوع نشان داد که مقدار انتشار سم در هوا تاثیرپذیری زیادی نسبت به سرعت پیشروی و نوع سم‌پاش داشت زیرا با تغییر سرعت پیشروی و همچنین تغییر نوع سم‌پاش، مقدار انتشار در هوا تغییرات معنی‌داری را نشان داد.

بهزادی‌پور و همکاران (Behzadipour, Ghaseminejad Raini, Asodar, Marzban, & Abdanan Mehdizadeh, 2017) در پژوهشی گزارش کردند که افزایش فشار و سرعت پیشروی سم‌پاش سبب کاهش نشست و افزایش مقدار بادبردگی سم می‌شود. نتایج نشان داد که با افزایش سرعت پیشروی، فشار هوا بر روی نازل‌ها بیشتر شد و این موضوع به ریزتر شدن اندازه قطرات کمک نمود و اثر افزایشی بر روی بادبردگی ذرات و اثر کاهشی بر میزان نشست ذرات سم بر روی کانوپی داشت.



شکل ۱۰- نتایج بررسی مقدار نشست محلول سم روی زمین در یک هکتار در حالت‌های مختلف سمپاشی

Fig.10. Pesticide solution deposition on the ground per hectare in different spraying modes

جدول ۷- نتایج تجزیه واریانس مقدار انتشار سم در هوا در یک هکتار در حالت‌های مختلف سمپاشی

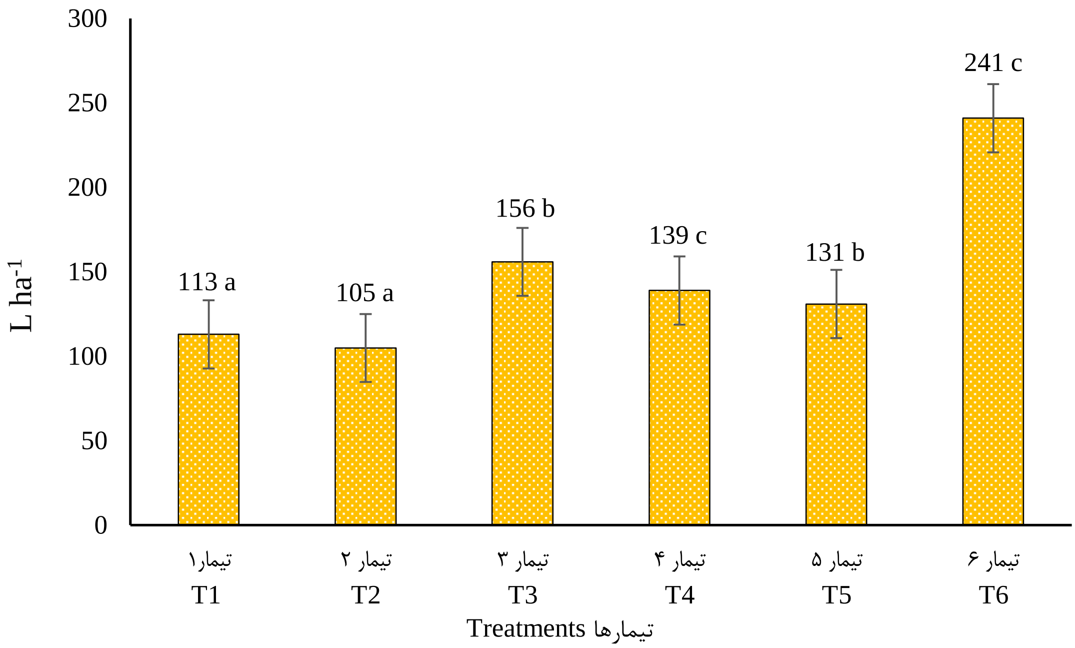
Table 7- ANOVA test results for airborne pesticide release per hectare in different spraying modes

منابع تغییرات **Source of variation**	درجه آزادی df	میانگین مربعات **Mean square**	F	P-value
سرعت پیشروی Speed	2	4818.389	37.224	.001**
نوع سم‌پاش Type of sprayer	1	45702.722	353.068	.001**
نوع سم‌پاش* سرعت پیشروی Speed * Type of sprayer	2	1812.056	13.999	.001**
Error خطا	12	129.444		
Coefficient of Variation (CV) ضریب تغییرات	0.34			

** در سطح ۱ درصد معنی‌دار است، * در سطح ۵ درصد معنی‌دار است، ns: غیر معنی‌دار

ns: Not significant, *Significant at the probability level of 5%, **Significant at the probability level of 1%

شکل ۱۱ نتایج مقدار انتشار محلول سم در هوا (رانش سم) در حالت‌های مختلف سم‌پاشی را نشان داده است. نتایج نشان داد که کمترین مقدار انتشار سم در هوا در حالت سم‌پاشی نرخ متغیر و در سرعت‌پیشروی ۱/۶ کیلومتر بر ساعت (۱۱۳ لیتر بر هکتار) و بیشترین مقدار در حالت سم‌پاشی نرخ ثابت و در سرعت‌پیشروی ۴/۸ کیلومتر بر ساعت (۲۴۱ لیتر بر هکتار) اتفاق افتاد. در سم‌پاشی نرخ ثابت و در سرعت‌پیشروی ۴/۸ کیلومتر بر ساعت، سرعت پیشروی نقش موثری در تغییر چرخه بادبردگی و افزایش آن و همچنین کاهش نشست سم روی درختان داشت. با توجه به این‌که در سرعت پیشروی بالاتر، فرصت کافی برای نشست سم روی درخت کمتر بود و از طرف جریان هوای اطراف درخت در سرعت‌پیشروی بالاتر دارای تغییر بیشتری بود، لذا مقدار انتشار سم در هوا در سرعت‌پیشروی بالاتر افزایش نشان داد. نتایج نشان داد که در سرعت‌پیشروی ۳/۲ کیلومتر بر ساعت، مقدار انتشار در هوا در کمترین حد خود بود.



شکل ۱۱- نتایج بررسی مقدار انتشار محلول سم در هوا در یک هکتار در حالت‌های مختلف سم‌پاشی

Fig.11. Airborne pesticide release per hectare in different spraying modes

مقدار مصرف کل محلول سم در هکتار در حالت‌های مختلف سم‌پاشی

جدول ۸ نتایج آزمون تجزیه واریانس مقدار کل مصرف سم در حالت‌های مختلف سم‌پاشی را نشان داده است.

نتایج آزمون تجزیه واریانس برای مقدار نشست سم روی درختان، زمین، انتشار در هوا و کل مصرف سم در هکتار نشان داد که مقدار این شاخص‌ها در دو حالت سم‌پاشی نرخ متغیر و نرخ ثابت دارای تفاوت معنی‌داری بود. با توجه به سطح معنی‌داری ($Sig<0.05$)، نتیجه گرفته شد که نوع سم‌پاش و سرعت پیشروی بر مقدار کل مصرف سم اثر معنی‌داری داشتند ولی اثر متقابل نوع سم‌پاش و سرعت پیشروی بر مقدار کل مصرف سم در هکتار معنی‌دار نبود. این نتایج با نتایج سهیلی‌فرد و همکاران (Soheilifard *et al.*, 2020) که گزارش کردند سرعت پیشروی بر درصد نشست محلول سم اثر معنی‌داری دارد، مطابقت داشت.

نتایج تحقیق خیری و همکاران (Khairy, Zaalouk, Rasmi, & Othman, 2020) نشان داد که با افزایش سرعت پیشروی سم‌پاشی، مقدار محلول سم مصرفی کاهش و با افزایش فشار سم‌پاشی برای انواع نازل‌ها در حالت استفاده و بدون استفاده از تکنیک بینایی ماشین نیز افزایش یافت. در حالت استفاده از تکنیک بینایی ماشین، در نازل نوع N4، فشار پاشش ۴۰۰ کیلوپاسکال و سرعت پیشروی ۰/۲۷ متر بر ثانیه، حداکثر درصد صرفه‌جویی محلول سم‌پاشی ۵۷/۵۷ درصد نسبت به حالت بدون استفاده از تکنیک بینایی ماشین بود. در حالت استفاده از تکنیک بینایی ماشین نسبت به حالت بدون بینایی و با نازل نوع N1، فشار پاشش ۲۵۰ کیلوپاسکال و سرعت پیشروی ۱/۱۲ متر بر ثانیه، حداقل درصد صرفه‌جویی در محلول سم‌پاشی ۴۷/۸۲ درصد گزارش شد.

جدول ۸- نتایج آزمون تجزیه واریانس مقدار کل مصرف سم در حالت‌های مختلف سم‌پاشی

Table 8- ANOVA test results for the total pesticide consumption in different spraying modes

منابع تغییرات Source of variation	درجه آزادی df	میانگین مربعات Mean square	F	P-value
سرعت پیشروی Speed	2	274440.056	7.230	.009**
نوع سم‌پاش Type of sprayer	1	13629420.500	359.046	.001**
نوع سم‌پاش* سرعت پیشروی Speed * Type of sprayer	2	56405.167	1.486	.265ns
خطا Error	12	37960.111		
ضریب تغییرات Coefficient of Variation (CV)	0.32			

** در سطح ۱ درصد معنی‌دار است، * در سطح ۵ درصد معنی‌دار است، ns: غیر معنی‌دار

ns: Not significant, *Significant at the probability level of 5%, **Significant at the probability level of 1%

جدول ۹ نتایج بررسی مقدار مصرف کل سم در هکتار و همچنین نشست روی درخت، زمین و انتشار در هوا در حالت‌های مختلف سم‌پاشی را نشان داده است. نتایج نشان داد که کمترین مقدار مصرف سم در حالت سم‌پاشی نرخ متغیر و در سرعت‌پیشروی ۱/۶ کیلومتر بر ساعت (۱۹۵۲ لیتر بر هکتار) و بیشترین مقدار مصرف سم در حالت سم‌پاشی نرخ ثابت در سرع ۱/۶ کیلومتر بر ساعت (۴۰۱۴ لیتر بر هکتار) به‌دست آمد. بیشترین مقدار صرفه‌جویی ناشی از کاربرد فناوری نرخ متغیر در سم‌پاشی باغات، در سرعت پیشروی ۱/۶ کیلومتر بر ساعت (۴۶ درصد) محاسبه شد. میانگین مقدار نشست سم در همه تیمارها در حالت سم‌پاشی نرخ ثابت نسبت به نرخ متغیر بیشتر بود. در پژوهشی کارمان و همکاران (Carman, Iwata, & Gunther, 1977) مقدار نشست آفت‌کش‌ها را بر روی بخش‌های مختلف درختان و خاک بررسی کردند. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، میزان نشست محلول سم روی کانوپی درخت، ۶۰ تا ۷۵ درصد تعیین شد.

کونینگ‌هام و هاردن (Cunningham & Harden, 1998) نیز در تلاش برای کاهش مقدار حجم سم مصرفی در باغات مرکبات، مقدار نشست سموم روی کانوپی و همچنین مقدار هدررفت آن‌ها از سطح کانوپی را بررسی نمودند. این محققان مقدار محلول سم بهینه از جهت نشست روی هدف و میزان هدر رفت را برابر با ۲۰۰۰ لیتر در هکتار تعیین کردند، بدین صورت که با افزایش مقدار محلول سم مصرفی در هکتار، میزان هدر رفت سم افزایش می‌یابد و از درصد نشست سم روی برگ درخت کاسته می‌شود. همچین در حالت بهینه، میزان نشست محلول سم روی هدف را ۰/۴۶ گزارش کردند. نتایج تحقیق حاضر نشان داد که در ترکیب تیماری حالت نرخ متغیر و سرعت پیشروی ۴/۸ کیلومتر بر ساعت، کمترین میزان مصرف سم (۱۹۵۲ لیتر در هکتار) برای یک هکتار باغ مرکبات اتفاق افتاد. این در حالی است که در حالت سم‌پاشی نرخ ثابت در سرعت ۴/۸ کیلومتر بر ساعت، مقدار مصرف سم ۳۵۰۹ لیتر در هکتار بود.

جدول ۹- مقدار کل مصرف و درصد صرفه‌جویی سم در هکتار در حالت‌های مختلف سم‌پاشی

Table 9- The total amount of consumption and percentage of saving of pesticide per hectare in different modes of spraying

عنوان Title	تیمار ۱ T 1	تیمار ۲ T 2	تیمار ۳ T 3	تیمار ٤ T 4	تیمار ٥ T 5	تیمار ٦ T 6
جمع کل نشست روی درخت، زمین و انتشار در هوا Sum of total deposition on trees, ground, and air emissions (L ha^{-1})	2185	2107	1952	4014	3777	3509
کاهش مصرف نسبت به نرخ ثابت Reduction in consumption compared to fixed rate (liters)	1829	1670	1557			
درصد صرفه‌جویی Savings percentage	46	44	44			

مقدار کارایی مصرف سم در هکتار در حالت‌های مختلف سم‌پاشی

جدول ۱۰ نتایج آزمون تجزیه واریانس درصد کارایی پاشش در حالت‌های مختلف سم‌پاشی را نشان داده است. نتایج نشان داد که نوع سم‌پاش، سرعت پیشروی و همچنین اثر متقابل نوع سم‌پاش و سرعت پیشروی اثر معنی‌داری بر کارایی پاشش داشت. بهزادی‌پور و همکاران (Behzadipour *et al.*, 2017) در پژوهشی بیان کردند که با کاهش فشار سم‌پاشی از ۳۵ به ۱۰ با مقدار بادبردگی کاهش یافت. این محققان گزارش کردند که با کاهش فشار سم‌پاشی از ۳۵ بـه ۱۰ بار مقدار نشست سم از ۷۷/۴ لیتر بر هکتار به ۱۴۲/۳ لیتر بـر هکتـار افزایش یافت.

جدول ۱۱ نتایج بررسی مقدار کاریی در حالت‌های مختلف سم‌پاشی را نشان داده است. کمترین و بیشترین مقدار کاریی به‌ترتیب در حالت سم‌پاشی نرخ متغیر در سرعت‌پیشروی ۱/۶ کیلومتر بر ساعت (۰/۷۰) و سم‌پاشی نرخ ثابت با سرعت‌پیشروی ۴/۸ کیلومتر بر ساعت (۰/۴۷) به‌دست آمد. شن و همکاران (Shen *et al.*, 2017) با توسعه یک سم‌پاش نرخ متغیر و دارای هدایت لیزری بـه‌منظور کنترل نـرخ جریان محلول سم خروجی متناسب با اندازه، شکل و تراکم کانوپی در زمان واقعی گزارش کردند که سم‌پاشی نرخ متغیر توانست ۱۲/۱٪ تا ۴۳/۳٪ از مقدار سم مصرفی در حالت سم‌پاشی نرخ ثابت را مصـرف کند و سبب صرفه‌جویی قابل‌توجهی در مصرف سم شود.

جدول ۱۰– نتایج آزمون تجزیه واریانس درصد کارایی سم‌پاشی در حالت‌های مختلف

Table 10- ANOVA test results of spraying efficiency percentage in different modes

منابع تغییرات Source of variation	درجه آزادی df	میانگین مربعات Mean square	F	P-value
سرعت پیشروی Speed	2	.002	5.890	.017**
Type of sprayer نوع سم‌پاش	1	.138	403.735	.001**
نوع سم‌پاش* سرعت پیشروی Speed * Type of sprayer	2	.001	4.200	.041**
Error خطا	12	.000		
Coefficient of Variation (CV) ضریب تغییرات	0.16			

** در سطح ۱ درصد معنی‌دار است، * در سطح ۵ درصد معنی‌دار است، ns: غیر معنی‌دار

ns: Not significant, *Significant at the probability level of 5%, **Significant at the probability level of 1%

جدول ۱۱– مقدار کارایی سم‌پاشی در حالت‌های مختلف سم‌پاشی

Table 11- Spraying efficiency in different spraying modes

عنوان Title	تیمار ۱ T 1	تیمار ۲ T 2	تیمار ۳ T 3	تیمار ٤ T 4	تیمار ٥ T 5	تیمار ٦ T 6
مقدار کارایی مصرف سم در هکتار (درصد) The efficiency of the use of Pesticide per hectare (percentage)	70	66	67	53	52	47

نتایج مقایسه و ارزیابی کیفیت سم‌پاشی در دو حالت نـرخ ثابت و نرخ متغیر

جدول ۱۲ نتایج آزمون تجزیه واریانس مقـدار کیفیـت سم‌پاشـی پاشش در حالت‌های مختلف سم‌پاشی را نشان داده است. با توجه بـه نتایج، سرعت پیشروی، نوع سم‌پاش و اثر متقابـل ایـن دو عامـل اثـر معنی‌داری بر شاخص کیفیت پاشش نداشت. نتایج نشان داد بـا توجـه به ثابت بـودن نـوع نازل‌هـا و همچنـین فشـار یکسـان سم‌پاشـی در تیمارهای مختلف، تغییر سرعت پیشروی سم‌پاشی اثر معنـی‌داری بـر کیفیت پاشش نداشت. همچنین با توجه به یکسان بودن نوع نازل‌های سم‌پاشی، نوع سم‌پاش از نظر نرخ متغیر و نرخ ثابت بودن نیـز عمـلا اثر معنی‌داری بر کیفیت پاشش نداشت. ارزیابی دو پارامتر قطـر میانـه عددی و قطر میانه حجمی نیز نشان داد که بین تیمارهای مختلف اثر معنـی‌داری از ایـن نظـر وجـود نداشـت. بهزادی‌پـور و همکـاران (Behzadipour *et al.*, 2017) با ارزیابی سم‌پاش توربولاینر گزارش کردند که کاهش فشار سم‌پاشی باعـث افـزایش قطـر و نیـز افـزایش حجم قطرات گردید که متناسب با افزایش حجم قطرات، افزایش قطر حجمی و قطر میانه عددی حاصل شد و به‌طور کلی با افـزایش فشـار سم‌پاشی، قطر قطرات و در نتیجـه شـاخص کیفیـت پاشـش کـاهش

یافت. سهیلی‌فرد و همکاران (Soheilifard *et al.*, 2020) نیز گزارش کردند که نوع نازل اثر معنی‌داری بر کیفیت سم‌پاشی نداشت و شاخص کیفیت پاشش در نازل‌های مخروطی توخالی و مخروطی توپر ۱/۶۳ به‌دست آمد. این محققان بیان کردند که اثر سه‌گانه‌ی نازل، فشار و سرعت پیشروی سم‌پاش بر قطر میانه حجمی نیز اثر معنی‌داری نداشت و تنها اثر اصلی فشار سم‌پاشی بر کیفیت سم‌پاشی معنی‌دار بود. اثرات نوع نازل و سرعت پیشروی سم‌پاش نیز معنی‌دار نبودند.

تواری و همکاران (Tewari *et al.*, 2018) در پژوهشی کاربرد یک سامانه فناوری پاشش خودکار مبتنی بر حسگر اولتراسونیک برای سم‌پاشی در باغ‌ها را با دو نوع نازل توربو و مخروطی بررسی کردند. برای تخمین خصوصیات سم‌پاشی از کاغذهای حساس به آب استفاده شد. نتایج نشان داد که سم‌پاشی با استفاده از نازل توربو باعث پوشش ۴۷/۴۱ درصدی سم‌پاشی شد و ۱۷۱ قطره در سانتی‌متر مربع با ۲۶ درصد صرفه‌جویی در مصرف سم را در پی داشت. علاوه بر این نتایج نشان داد که میزان پوشش سم توسط نازل توربو بیشتر از نازل مخروطی بود. همچنین فناوری پاشش مبتنی بر حسگر اولتراسونیک به‌خوبی توانست از سم‌پاشی در ناحیه بدون کانوپی خودداری کند.

جدول ۱۳ نتایج آزمون تجزیه واریانس برای شاخص‌های قطر میانه عددی، قطر میانه حجمی و درصد پوشش را نشان داده است. نتایج نشان داد که شاخص درصد پوشش کاغذهای حساس به آب نیز در تیمارهای مختلف اثر معنی‌داری نداشت.

جدول ۱۲- نتایج آزمون تجزیه واریانس کیفیت سم‌پاشی در حالت‌های مختلف

Table 12- ANOVA test results of spraying quality in different modes

منابع تغییرات Source of variation	درجه آزادی df	میانگین مربعات Mean square	F	P-value
سرعت پیشروی Speed	2	35.962	1.723	.220 ns
نوع سم‌پاش Type of sprayer	1	1.773	.085	.776 ns
نوع سم‌پاش* سرعت پیشروی Speed * Type of sprayer	2	4.168	.200	.822 ns
خطا Error	12	20.869		
ضریب تغییرات Coefficient of Variation (CV)	103.1			

** در سطح ۱ درصد معنی‌دار است، * در سطح ۵ درصد معنی‌دار است، ns: غیر معنی‌دار

ns: Not significant, *Significant at the probability level of 5%, **Significant at the probability level of 1%

نتایج مقایسه میانگین شاخص کیفیت پاشش نشان داد که تفاوت معنی‌داری بین تیمارها وجود نداشت. تیمار سوم یعنی سم‌پاشی با سم‌پاش نرخ متغیر در سرعت ۴/۸ کیلومتر بر ساعت، بهترین کیفیت پاشش را دارا بود. در سم‌پاشی با سرعت‌پیشروی ۱/۶ کیلومتر بر ساعت در هر دو حالت سم‌پاشی نرخ متغیر و نرخ ثابت، شاخص کیفیت پاشش بدترین شرایط را دارا بود. ناصری و همکاران (Naseri, Abbaspour Fard, Chaji, & Heydarzadeh, 2007) در پژوهشی اثر افزایش سرعت پیشروی را در سم‌پاش توربولاینر بررسی کردند و نتیجه گرفتند که با افزایش سرعت پیشروی در سه سطح ۲/۴۳، ۵/۲۰ و ۸/۱۲ کیلومتر بر ساعت، قطر میانه حجمی به‌ترتیب ۴/۰۵، ۱/۷۵ و ۰/۹۸ میلی‌متر و قطر میانه عددی به‌ترتیب ۱/۲۶، ۰/۲۲ و ۰/۱ میلی‌متر کاهش یافت. این محققان گزارش کردند که در سم‌پاش توربولاینر، بهترین شاخص کیفیت پاشش در سرعت‌پیشروی سم‌پاشی ۵/۲ کیلومتر بر ساعت اتفاق افتاد که با نتایج این تحقیق همخوانی دارد. بهزادی‌پور و همکاران (Behzadipour *et al.*, 2017) نیز گزارش کردند که با افزایش سرعت پیشروی سم‌پاشی از ۹ به ۱۳/۵ کیلومتر بر ساعت، قطر میانه حجمی و قطر میانه عددی کاهش یافت و متناسب با افزایش سرعت پیشروی، فشار هوا روی نازل‌ها افزایش و سبب ریزتر شدن اندازه، قطر و حجم قطرات گردید ولی افزایش فشار سبب کاهش شاخص کیفیت پاشش گردید. کاهش قطر میانه عددی و قطر میانه حجمی می‌تواند پتانسیل بادبردگی سموم را افزایش دهد. بالسری و همکاران (Balsari, Marucco, & Tamagnone, 2014) نیز جریان هوای ایجادشده توسط سم‌پاش‌های توربینی را یکی از عوامل موثر بر میزان بادبردگی عنوان کردند. بنابراین نتایج این تحقیق با نتایج گزارش‌شده توسط دیگر محققان نیز مطابقت داشت و از آن‌جا که در پژوهش حاضر نوع نازل‌ها و فشار سم‌پاشی در تیمارهای مختلف یکسان بود، لذا سرعت پیشروی به‌تنهایی اثر معنی‌داری بر کیفیت پاشش و درصد پاشش نداشت. از طرفی تغییر نوع سم‌پاش از حالت نرخ ثابت به نرخ متغیر نیز فقط جریان سم‌پاشی بین فواصل درختان را قطع نمود و این امر (با توجه به ثابت بودن فشار سم‌پاشی و نوع نازل‌ها) اثری در تغییر کیفیت و درصد پاشش نداشت.

جدول ۱۳- نتایج آزمون تجزیه واریانس شاخص‌های قطر میانه عددی، قطر میانه حجمی و درصد پوشش در حالت‌های مختلف

Table 13- ANOVA test results of numerical mean diameter, volume mean diameter, and coverage percentage in different modes

منابع تغییرات Source of variation		درجه آزادی df	میانگین مربعات Mean square	F	P-value
سرعت پیشروی Speed	قطر میانه عددی Number Median Diameter	2	58.783	1.259	.319 ns
	قطر میانه حجمی Volume Median Diameter	2	118.757	2.444	.129 ns
	درصد پوشش Coverage percentage	2	7.404	.786	.478 ns
نوع سم‌پاش Type of sprayer	قطر میانه عددی Number Median Diameter	1	68.992	1.477	.248 ns
	قطر میانه حجمی Volume Median Diameter	1	104.835	2.157	.168 ns
	درصد پوشش Coverage percentage	1	8.736	.928	.355 ns
نوع سم‌پاش* سرعت پیشروی Speed * Type of sprayer	قطر میانه عددی Number Median Diameter	2	152.718	3.270	.074 ns
	قطر میانه حجمی Volume Median Diameter	2	215.075	4.426	.036 ns
	درصد پوشش Coverage percentage	2	20.334	2.159	.158 ns
خطا Error	قطر میانه عددی Number Median Diameter	12	46.706		
	قطر میانه حجمی Volume Median Diameter	12	48.598		
	درصد پوشش Coverage percentage	12	9.418		
ضریب تغییرات Coefficient of Variation (CV)	قطر میانه عددی Number Median Diameter	68.5%			
	قطر میانه حجمی Volume Median Diameter	59.9%			
	درصد پوشش Coverage percentage	83.1%			

** در سطح ۱ درصد معنی‌دار است، * در سطح ۵ درصد معنی‌دار است، ns: غیر معنی‌دار

ns: Not significant, *Significant at the probability level of 5%, **Significant at the probability level of 1%

نتیجه‌گیری

فن‌آوری‌های نوین نقش مهمی در افزایش بهره‌وری بخش کشاورزی دارند و در صورت عدم استفاده از این فن‌آوری‌ها چالش‌های مربوط به پایداری تولید در آینده بیش‌ازپیش افزایش می‌یابد. یکی از عملیات مهم در تولید محصولات کشاورزی، مرحله سم‌پاشی است. در این پژوهش یک سم‌پاش نرخ ثابت به نرخ متغیر توسعه داده شد و ارزیابی گردید. توسعه‌ی این سم‌پاش از نرخ ثابت به نرخ متغیر مبتنی بر پردازش تصویر، استفاده از حسگر اولتراسونیک و شیر برقی نرخ متغیر بود. نتایج ارزیابی و مقایسه این دو سم‌پاش نشان داد که سم‌پاش نرخ متغیر توانست با تشخیص حجم کانوپی در زمان واقعی مقدار پاشش سم را کنترل کند و در بهترین حالت (سرعت ۱/۶ کیلومتر بر ساعت)، صرفه‌جویی ۴۶ درصدی و کارایی ۷۰ درصدی سم‌پاشی را به همراه داشت. در همه‌ی تیمارهای مورد بررسی، نوع سم‌پاش و سرعت پیشروی سم‌پاشی اثر معنی‌داری بر تغییرات مقدار نشست سم داشتند ولی اثر متقابل نوع سم‌پاش و سرعت پیشروی سم‌پاشی اثر معنی‌داری بر مقدار نشست سم روی درختان و کل مصرف سم در هکتار نداشت. درصد پوشش محلول سم روی هدف در تیمارهای مختلف نیز تفاوت معنی‌داری نداشت و بهترین کیفیت پاشش در سم‌پاشی نرخ متغیر با سرعت‌پیشروی ۴/۸ کیلومتر بر ساعت اتفاق افتاد. با استفاده از سم‌پاش نرخ متغیر ضمن صرفه‌جویی در مصرف سموم شیمیایی و هزینه‌های سم‌پاشی، مقدار انتشار سموم که سبب آلایندگی‌های زیست‌محیطی می‌شود نیز کاهش خواهد یافت. پیشنهاد می‌شود در تحقیقات آینده سامانه‌ی نرخ متغیر مبتی بر

نازل‌های مستقل توسعه داده شود تا بتوان پاشش لحظه‌ای در هر نازل را کنترل نمود.

سپاسگزاری

این مقاله بخشی از رساله دکتری گروه مهندسی مکانیزاسیون و ماشین‌های کشاورزی از دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان می‌باشد. با تشکر از معاونت پژوهشی دانشگاه که حمایت مالی این پژوهش را بر عهده گرفت.

مشارکت نویسندگان

رستم فتحی: جمع‌آوری داده‌ها، تحلیل آماری، پردازش آماری، استخراج و تهیه متن مقاله
محمود قاسمی‌نژاد رائینی: نظارت و مدیریت، مفهوم‌سازی، ویرایش متن
سامان آبدانان مهدی‌زاده: خدمات نرم‌افزاری، ویرایش متن
مرتضی تاکی: خدمات نرم‌افزاری، مفهوم‌سازی، ویرایش متن
مصطفی مردانی نجف‌آبادی: ویرایش متن

تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع بین نویسندگان این مقاله وجود ندارد.

References

1. Asaei, H., Jafari, A., & Loghavi, M. (2019). Site-specific orchard sprayer equipped with machine vision for chemical usage management. *Computers and Electronics in Agriculture*, *162*, 431-439. https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.04.040
2. Balsari, P., Marucco, P., & Tamagnone, M. (2007). A test bench for the classification of boom sprayers according to drift risk. *Crop Protection*, *26*(10), 1482-1489. https://doi.org/10.1016/j.cropro.2006.12.012
3. Baran, M. F., Lüle, F., & Gökdoğan, O. (2017). Energy input-output analysis of organic grape production: A case study from Adiyaman province. *Erwerbs-Obstbau*, *59*(4), 275-279. https://doi.org/10.1007/s10341-017-0322-1
4. Behzadipour, F., Ghaseminejad Raini, M., Asodar, M. A., Marzban, A., & Abdanan Mehdizadeh, S. (2017). Evaluation of technical factors of agricultural turbine spraying on spraying quality and droplet diameter by image processing. *Jurnal of Agricultural Machinery*, *7*(1), 61-72. (in Persian). https://doi.org/10.22067/jam.v7i1.48194
5. Berenstein, R., Shahar, O. B., Shapiro, A., & Edan, Y. (2010). Grape clusters and foliage detection algorithms for autonomous selective vineyard sprayer. *Intelligent Service Robotics*, *3*, 233-243. https://doi.org/10.1007/s11370-010-0078-z
6. Carman, G. E., Iwata, Y., & Gunther, F. A. (1977). Pesticide deposition on citrus orchard soil resulting from spray drift and runoff. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, *18*, 706-710.
7. Carvalho, F. P. (2017). Pesticides, environment, and food safety. *Food and Energy Security*, *6*(2), 48-60. https://doi.org/10.1002/fes3.108
8. Chen, L., Wallhead, M., Reding, M., Horst, L., & Zhu, H. (2020). Control of insect pests and diseases in an Ohio fruit farm with a laser-guided intelligent sprayer. *HortTechnology*, *30*(2), 168-175. https://doi.org/10.21273/HORTTECH04497-19
9. Chen, Y., Ozkan, H. E., Zhu, H., Derksen, R. C., & Krause, C. R. (2013). Spray deposition inside tree canopies from a newly developed variable-rate air-assisted sprayer. *Transactions of the ASABE*, *56*(6), 1263-1272.
10. Ciacci, L., & Passarini, F. (2020). Life cycle assessment (LCA) of environmental and energy systems. *Energies*, *13*(22), 5892. https://doi.org/10.3390/en13225892
11. Cobbenhagen, A. T. J. R., Antunes, D. J., van de Molengraft, M. J. G., & Heemels, W. P. M. H. (2021). Opportunities for control engineering in arable precision agriculture. *Annual Reviews in Control*, *51*, 47-55. https://doi.org/10.1016/j.arcontrol.2021.01.001
12. Cunningham, G. P., & Harden, J. (1998). Reducing spray volumes applied to mature citrus trees. *Crop Protection*, *17*(4), 289-292. https://doi.org/10.1016/S0261-2194(98)00007-6
13. Dou, H., Zhang, C., Li, L., Hao, G., Ding, B., Gong, W., & Huang, P. (2018, September). Application of variable spray technology in agriculture. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 186, No. 5, p. 012007). IOP Publishing. https://doi.org/10.1088/1755-1315/186/5/012007
14. El Bilali, H., Callenius, C., Strassner, C., & Probst, L. (2019). Food and nutrition security and sustainability transitions in food systems. *Food and Energy Security*, *8*(2), e00154. https://doi.org/10.1002/fes3.154
15. Escolà, A., Rosell-Polo, J. R., Planas, S., Gil, E., Pomar, J., Camp, F., ... & Solanelles, F. (2013). Variable rate sprayer. Part 1–Orchard prototype: Design, implementation and validation. *Computers and Electronics in Agriculture*, *95*, 122-135. https://doi.org/10.1016/j.compag.2013.02.004
16. Garcerá, C., Moltó, E., & Chueca, P. (2017). Spray pesticide applications in Mediterranean citrus orchards:

Canopy deposition and off-target losses. *Science of the Total Environment*, *599*, 1344-1362. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.05.029
17. Gil, E., & Escolà, A. (2009). Design of a decision support method to determine volume rate for vineyard spraying. *Applied Engineering in Agriculture*, *25*(2), 145-151. https://doi.org/10.13031/2013.26323
18. Gil, E., Llorens, J., Llop, J., Fàbregas, X., & Gallart, M. (2013). Use of a terrestrial LIDAR sensor for drift detection in vineyard spraying. *Sensors*, *13*(1), 516-534. https://doi.org/10.3390/s130100516
19. Gil, E., Llorens, J., Llop, J., Fàbregas, X., Escolà, A., & Rosell-Polo, J. R. (2013). Variable rate sprayer. Part 2–Vineyard prototype: Design, implementation, and validation. *Computers and Electronics in Agriculture*, *95*, 136-150. https://doi.org/10.1016/j.compag.2013.02.010
20. Ilica, A., & Boz, A. F. (2018). Design of a nozzle-height control system using a permanent magnet tubular linear synchronous motor. *Journal of Agricultural Sciences*, *24*(3), 374-385. https://doi.org/10.15832/ankutbd.456662
21. Kasner, E. J., Fenske, R. A., Hoheisel, G. A., Galvin, K., Blanco, M. N., Seto, E. Y., & Yost, M. G. (2018). Spray drift from a conventional axial fan airblast sprayer in a modern orchard work environment. *Annals of Work Exposures and Health*, *62*(9), 1134-1146. https://doi.org/10.1093/annweh/wxy082
22. Khairy, M. F. A., Zaalouk, A. K., Rasmi, A. S., & Othman, Y. K. (2020). A prototype for spraying pesticide using vision technique. *Misr Journal of Agricultural Engineering*, *37*(3), 249-262. https://doi.org/10.21608/mjae.2020.103153
23. Landers, A. J. (2008). Innovative technologies for the precise application of pesticides in orchards and vineyards. *International Advances in Pesticide Application, Robinson College, Cambridge, UK, 9-11 January 2008*, 411-416.
24. Lindgren, E., Harris, F., Dangour, A. D., Gasparatos, A., Hiramatsu, M., Javadi, F., ... & Haines, A. (2018). Sustainable food systems—a health perspective. *Sustainability science*, *13*, 1505-1517. https://doi.org/10.1007/s11625-018-0586-x
25. Llorens, J., Gil, E., Llop, J., & Escolà, A. (2010). Variable rate dosing in precision viticulture: Use of electronic devices to improve application efficiency. *Crop Protection*, *29*(3), 239-248. https://doi.org/10.1016/j.cropro.2009.12.022
26. Mahmud, M. S., Zahid, A., He, L., Choi, D., Krawczyk, G., Zhu, H., & Heinemann, P. (2021). Development of a LiDAR-guided section-based tree canopy density measurement system for precision spray applications. *Computers and Electronics in Agriculture*, *182*, 106053. https://doi.org/10.1016/j.compag.2021.106053
27. Mamane, A., Raherison, C., Tessier, J. F., Baldi, I., & Bouvier, G. (2015). Environmental exposure to pesticides and respiratory health. *European Respiratory Review*, *24*(137), 462-473. https://doi.org/10.1183/16000617.00006114
28. Méndez-Vázquez, L. J., Lira-Noriega, A., Lasa-Covarrubias, R., & Cerdeira-Estrada, S. (2019). Delineation of site-specific management zones for pest control purposes: Exploring precision agriculture and species distribution modeling approaches. *Computers and Electronics in Agriculture*, *167*, 105101. https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.105101
29. Mooney, D. F., Larson, J. A., Roberts, R. K., & English, B. C. (2009). *Economics of the variable rate technology investment decision for agricultural sprayers* (No. 1369-2016-108610). https://doi.org/10.22004/ag.econ.46860
30. Naseri, M., Abbaspour Fard, M. H., Chaji, H., & Heydarzadeh, A. (2007). Analysis of the effect of nozzle orifice diameter, pump pressure and tractor forward speed on spraying uniformity in agricultural turbine sprayer (turboliner). The 5th National Congress of Agricultural Machines and Mechanization of Iran. Ferdasi University of Mashhad. P. 9. (in Persian).
31. Oberti, R., Marchi, M., Tirelli, P., Calcante, A., Iriti, M., Tona, E., ... & Ulbrich, H. (2016). Selective spraying of grapevines for disease control using a modular agricultural robot. *Biosystems Engineering*, *146*, 203-215. https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2015.12.004
32. Pergher, G. (2001). Recovery rate of tracer dyes used for spray deposit assessment. *Transactions of the ASAE*, *44*(4), 787. https://doi.org/10.13031/2013.6240
33. Pimentel, D., & Lehman, H. (Eds.). (1993). *The pesticide question: Environment, economics and ethics*. Springer Science & Business Media.
34. Rathnayake, A. P., Chandel, A. K., Schrader, M. J., Hoheisel, G. A., & Khot, L. R. (2021). Spray patterns and perceptive canopy interaction assessment of commercial airblast sprayers used in Pacific Northwest perennial specialty crop production. *Computers and Electronics in Agriculture*, *184*, 106097. https://doi.org/10.1016/j.compag.2021.106097
35. Rodrigo, M. A., Oturan, N., & Oturan, M. A. (2014). Electrochemically assisted remediation of pesticides in soils and water: a review. *Chemical Reviews*, *114*(17), 8720-8745. https://doi.org/10.1021/cr500077e
36. Safari, M., Amirsheghaghi, F., Loveymi, N., & Chagi, H. (2009). Assessment of common sprayer used in wheat fields. *Karaj Agricultural Engineering Research Institute Publications*, *10*(4), 1-12. (In Persian).
37. Shafii, A. 2008. Principles of agricultural machinery. Tehran University Publications. Third edition. 498 pages (in

Farsi).
38. Shen, Y., Zhu, H., Liu, H., Chen, Y., & Ozkan, E. (2017). Development of a laser-guided, embedded-computer-controlled, air-assisted precision sprayer. *Transactions of the ASABE*, *60*(6), 1827-1838. https://doi.org/10.13031/trans.12455
39. Soheilifard, F., Marzban, A., Raini, M. G., Taki, M., & van Zelm, R. (2020). Chemical footprint of pesticides used in citrus orchards based on canopy deposition and off-target losses. *Science of the Total Environment*, *732*, 139118. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139118
40. Solanelles, F., Escolà, A., Planas, S., Rosell, J. R., Camp, F., & Gràcia, F. (2006). An electronic control system for pesticide application proportional to the canopy width of tree crops. *Biosystems Engineering*, *95*(4), 473-481. https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2006.08.004
41. Springmann, M., Clark, M., Mason-D'Croz, D., Wiebe, K., Bodirsky, B. L., Lassaletta, L., ... & Willett, W. (2018). Options for keeping the food system within environmental limits. *Nature*, *562*(7728), 519-525. https://doi.org/10.1038/s41586-018-0594-0
42. Subramanian, V., Burks, T. F., & Arroyo, A. A. (2006). Development of machine vision and laser radar based autonomous vehicle guidance systems for citrus grove navigation. *Computers and Electronics in Agriculture*, *53*(2), 130-143. https://doi.org/10.1016/j.compag.2006.06.001
43. Taheri-Rad, A., Khojastehpour, M., Rohani, A., Khoramdel, S., & Nikkhah, A. (2017). Energy flow modeling and predicting the yield of Iranian paddy cultivars using artificial neural networks. *Energy*, *135*, 405-412. https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.06.089
44. Tewari, V. K., Chandel, A. K., Nare, B., & Kumar, S. (2018). Sonar sensing predicated automatic spraying technology for orchards. *Current Science*, *115*(6), 1115-1123.
45. Yadav, G. S., Das, A., Lal, R., Babu, S., Datta, M., Meena, R. S., ... & Singh, R. (2019). Impact of no-till and mulching on soil carbon sequestration under rice (*Oryza sativa* L.)-rapeseed (*Brassica campestris* L. var. rapeseed) cropping system in hilly agro-ecosystem of the Eastern Himalayas, India. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, *275*, 81-92. https://doi.org/10.1016/j.agee.2019.02.001
46. Zaman, Q. U., Esau, T. J., Schumann, A. W., Percival, D. C., Chang, Y. K., Read, S. M., & Farooque, A. A. (2011). Development of prototype automated variable rate sprayer for real-time spot-application of agrochemicals in wild blueberry fields. *Computers and Electronics in Agriculture*, *76*(2), 175-182. https://doi.org/10.1016/j.compag.2011.01.014
47. Zürey, Z., Balci, S., & Sabanci, K. (2020). Automatic nozzle control system with ultrasonic sensor for orchard sprayers. *European Journal of Technique (EJT)*, *10*(2), 264-273. https://doi.org/10.36222/ejt.715015